

Министерство обороны Российской Федерации  
Министерство промышленности и энергетики Саратовской области  
ПАО «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 18

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

Под редакцией профессора *А. В. Ляшенко*

Саратов  
Издательство Саратовского университета  
2015

УДК 621.382.029.6  
ББК 548.537.611.44  
Г44

**Гетеромагнитная микроэлектроника** : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. – Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. – 148 с. : ил.

В настоящем выпуске сборника представлены материалы по гетеромагнитной микроэлектронике, магнетонным кристаллам, гибридным волнам, моделированию случайных процессов, бесплатформенным системам ориентации, методическим аспектам физического образования, инновациям в промышленности и особенностям рисков в условиях санкций.

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

Начиная с 2013 г. в соответствии с изменившимися требованиями к изданиям ВАК сборник научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника» выходит четыре раза в год (два выпуска в открытом и два спецвыпуска в ограниченном доступе).

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

- термостабилизация гетеромагнитного датчика;
- магнитные свойства пленок железиттриевого граната в ненасыщенных состояниях;
- особенности формирования запрещенных зон в структуре двух магнитных кристаллов;
- распространение гибридных волн в поперечно ограниченной слоистой мультиферроидной структуре;
- определение случайных величин и моделирование диффузионных процессов в автоэмиссионной электронике;
- построение модулей преобразования форматов данных в вычислительной технике;
- бесплатформенная система ориентации вращающихся в магнитном поле подвижных объектов;
- устройство для реализации высокоскоростных криптографических шифров;
- обработка сигналов в системах связи.

В разделе «Методические аспекты физического образования» приведены материалы о магистерской программе «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» и современных образовательных технологиях при преподавании специальных дисциплин.

В разделе «Экономика в промышленности» рассмотрены:

- инвестирование наукоемких высокотехнологичных инновационных предприятий;
- применение концепции проектного управления в инновационной деятельности;
- модели стратегического управления деятельностью центров обработки данных;
- особенности и перспективы коммерциализации и использования результатов инновационной деятельности ОПК России;
- финансовые риски в условиях санкций: новые вызовы и новые возможности.

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

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382.017

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

**С. В. Овчинников, А. С. Ретунский**

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

Предложена простая методика оценки эффективности применения термоэлектрических модулей Пельтье в целях термостабилизации радиоэлектронного устройства при повышенных температурах среды. Рассмотрено применение модулей Пельтье для термостабилизации оригинальных гетеромагнитных датчиков магнитного поля. Определены требования к радиаторам системы термостабилизации и рассчитано время тепловой готовности датчика.

*Ключевые слова:* гетеромагнитный датчик магнитного поля, термоэлектрический модуль, тепловое сопротивление радиатора, время тепловой готовности.

### **Heteromagnetic Magnetic Field Sensor, Operating in High Temperature Environment, Thermostabilized by Thermoelectric Modules**

**S. V. Ovchinnikov, A. S. Retunsky**

Simple method for efficiency estimation of Peltier element as a heat stabiliser in radio-electronic devices at high temperatures is described in the article. Peltier element application for heteromagnetic magnetic field sensor temperature stabilization has been studied. Parameters of heatsink and standby time of sensor has been calculated.

*Key words:* heteromagnetic magnetic field sensor, thermoelectric module, thermal impedance of heatsink, thermal standby time.

Гетеромагнитный датчик слабых магнитных полей представляет собой законченное функциональное устройство [1, 2] с первичным преобразователем в виде твердотельного автогенератора на полевых или биполярных транзисторов с ферритовым (железоиттриевый гранат – ЖИГ) микрорезонатором в цепи обратной связи. Ферритовый микрорезонатор находится в поле постоянного магнита, обеспечивающего требуемый уровень индукции поля подмагничивания.

Параметры ЖИГ-микрорезонатора и магнита системы подмагничивания зависят от температуры [3–5]. Следствием этого является зависимость от температуры информационного сигнала – частоты генерации первичного преобразователя датчика. Поскольку датчик предназначен для работы при различных температурах окружающей среды, в систему обработки данных, входящей в состав датчика, можно ввести алгоритм, приводящий

данные первичного преобразователя к некоторой опорной температуре. Принцип работы алгоритма описан в [6] и базируется на показаниях датчиков температуры, включенных в состав датчика магнитного поля. Ясно, что такая система обработки данных должна содержать высокопроизводительный процессор.

Одной из возможностей минимизации влияния температурного фактора на информационный сигнал является термостабилизация первичного преобразователя датчика в небольшом температурном диапазоне. Очевидно, что система термостабилизации датчика потребует дополнительных энергетических затрат, ухудшит его масс-габаритные показатели и увеличит его стоимость. Однако в тех случаях, когда указанные негативные факторы не являются решающими, применение системы термостабилизации вполне оправданно.

Одним из вариантов построения такой системы является использование термоэлектрических модулей (ТЭМ) Пельтье [7, 8], которые обладают сравнительно высокой надежностью, допускают каскадное использование, что позволяет довести температуру корпусов охлаждаемых электронных элементов до отрицательных значений даже при их значительной мощности рассеяния. Кроме того, ТЭМ могут работать в инверсном режиме, выполняя функцию нагревателя.

В то же время ТЭМ имеют относительно низкий коэффициент полезного действия и сами являются источниками тепла. Поэтому для системы охлаждения на основе ТЭМ требуется эффективный теплоотвод. И наконец, ТЭМ в случае выхода его из строя изолирует охлаждаемый элемент от теплоотвода.

Таким образом, разработка системы термостабилизации на основе ТЭМ в основном сводится к выбору типа термоэлектрического модуля, конструкции теплоотвода (радиатора) для горячей поверхности холодильника и системы управления питанием ТЭМ, отслеживающей температуры термостабилизируемого объекта и окружающей среды. При этом оптимальным можно считать такой вариант конструкции, который обеспечивает заданный тепловой режим датчика при минимальном потреблении энергии. Однако паспортные данные ТЭМ не позволяют дать прямого ответа о преимуществах того или иного типа модуля Пельтье по отношению к конкретной системе отвода тепла. Выбор модуля по величине максимальной холодопроизводительности и максимальному перепаду температур между спаями не дает возможности сравнительной оценки ТЭМ.

В качестве критерия для оценки эффективности применения ТЭМ для термостабилизации гетеромагнитного датчика магнитного поля предлагается принять максимально возможное тепловое сопротивление радиатора системы, при котором обеспечивается требуемый тепловой режим датчика. Очевидно, что для варианта конструкции с радиатором, тепловое сопротивление которого не будет превышать такого максимального значения, в заданном рабочем температурном диапазоне можно выбрать ТЭМ, исходя из соображений энергетической экономичности.

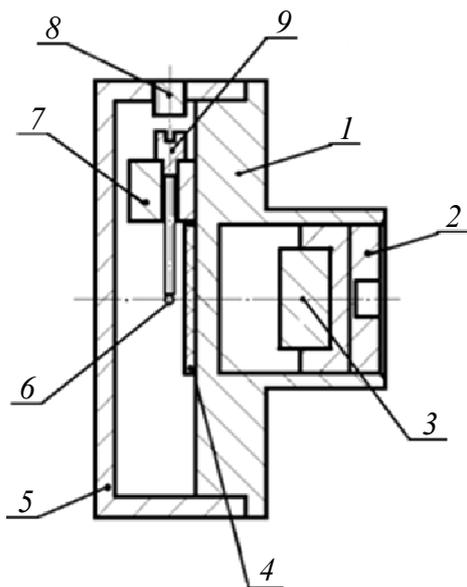


Рис. 1. Схема одноосного гетеромагнитного датчика

ентации оси намагничения сферы через заглушаемое отверстие 8. Вся электронная система закрыта крышкой 5. Такая конструкция датчика дает возможность размещения ТЭМ только со стороны крышки корпуса.

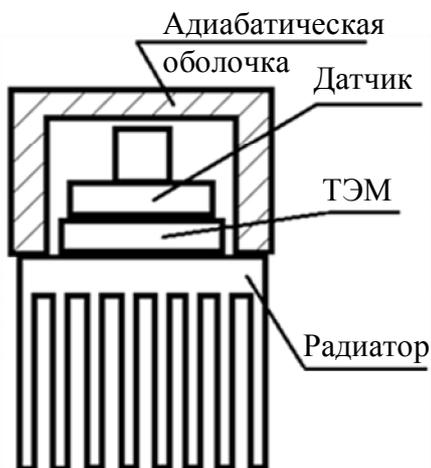


Рис. 2. Теплофизическая модель гетеромагнитного датчика с ТЭМ

ляемая в электронной плате датчика, через крышку датчика передается на холодные спаи ТЭМ, имеющие температуру  $T_{хол}$ . Свяжем требуемую температуру стабилизации  $T_{ст}$  с крышкой корпуса датчика, так как в силу локализованного тепловыделения температурное поле датчика, очевидно, будет неоднородным. Температуры всех элементов датчика можно определить из решения соответствующей задачи теплопроводности по известной температуре крышки корпуса. Такие задачи для разнообразных конструктивных исполнений гетеромагнитных систем рассмотрены, например, в [9–12].

Рассмотрим пример такой оценки на основе одноосного гетеромагнитного датчика, схематическое представление которого приведено на рис. 1. Предполагаем, что датчик должен работать при повышенной температуре окружающей среды.

Дюралевый корпус 1 датчика содержит электронную плату 4, резьбовое отверстие под винт 2 крепления постоянного магнита 3, а также сферический ЖИГ-резонатор 6, размещенный в пределах объемного элемента обратной связи (на рис. 1 не показан) полупроводникового генератора, сформированного на плате 4. ЖИГ-сфера 6 закреплена на держателе 9, вставленном в крепление 7, что допускает коррекцию ориентации

Соответствующая теплофизическая модель датчика с ТЭМ изображена на рис. 2. Датчик со стороны крышки расположен на холодной грани ТЭМ, который, в свою очередь, размещен своей горячей гранью на радиаторе. Вся система, за исключением радиатора, закрыта адиабатической оболочкой.

Оценку максимально допустимого теплового сопротивления радиатора проведем для наиболее напряженного теплового режима, когда потребляемый модулем Пельтье ток  $I$  равен характеристическому значению  $I_X$ , а отводимая от датчика тепловая мощность  $P_{Т1}$  максимальна. Тепловая мощность  $P_{Т1}$ , выделяемая

Введем суммарное тепловое сопротивление  $R_{T_{\text{хол}}}$  всех возможных промежуточных прослоек между холодной гранью ТЭМ и крышкой корпуса датчика, включая контактные тепловые сопротивления, и тепловое сопротивление  $R_{T_p}$  радиатора, определяющее температурный перепад между горячей гранью ТЭМ с температурой  $T_{\text{гор}}$  и окружающей средой с температурой  $T_C$ . Тогда перепад температур между крышкой корпуса и холодной гранью ТЭМ определяется как

$$T_{\text{ст}} - T_{\text{хол}} = P_{T1} \cdot R_{T_{\text{хол}}}. \quad (1)$$

Аналогично определяется перепад температур между горячей гранью ТЭМ и окружающей средой:

$$T_{\text{гор}} - T_C = P_{T2} \cdot R_{T_p}, \quad (2)$$

где  $P_{T2} = P_{T1} + I_X^2 \cdot R$ ;  $R$  – омическое сопротивление ТЭМ.

Тогда

$$T_{\text{гор}} = T_C + (P_{T1} + R \cdot I_X^2) \cdot R_{T_p}. \quad (3)$$

Рабочую характеристику ТЭМ  $T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}} = f(P_{T1})$  обычно считают линейной, причем максимальная разность температур  $\Delta T_m = T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}$  при  $P_{T1} = 0$  и характеристическая холодопроизводительность  $Q_X = P_{T1}$  при  $T_{\text{гор}} = T_{\text{хол}}$  являются паспортными данными ТЭМ. Вводя в рассмотрение рабочий температурный перепад  $\Delta T = T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}$  при  $P_{T1} > 0$ , получим

$$\Delta T = \Delta T_m \left( 1 - \frac{P_{T1}}{Q_X} \right). \quad (4)$$

Из выражений (1)–(4) следует:

$$R_{T_p} = \frac{\Delta T_m + T_{\text{ст}} - T_C - P_{T1} R_{T_{\text{хол}}} - \Delta T_m P_{T1} / Q_X}{P_{T1} + I_X^2 R}. \quad (5)$$

Поскольку тепловое сопротивление радиатора не может быть отрицательным, то из (5) вытекает, что отводимая от охлаждаемого объекта тепловая мощность должна удовлетворять следующему неравенству:

$$P_{T1} < \frac{\Delta T_m + T_{\text{ст}} - T_C}{R_{T_{\text{хол}}} + \Delta T_m / Q_X} = P_{T_{\text{кр}}} \quad (6)$$

где  $P_{Ткр}$  – критическое значение собственной мощности тепловыделения охлаждаемого объекта при выбранных параметрах ТЭХ и температурах стабилизации и окружающей среды. При  $P_{Т1} > P_{Ткр}$  система термостабилизации неработоспособна. Если же собственное тепловыделение охлаждаемого объекта удовлетворяет неравенству (6), то выражение (5) дает информацию о максимально возможном значении теплового сопротивления радиатора, обеспечивающего работоспособность системы.

Для практического применения рассматривались однокаскадные термоэлектрические модули производства ООО НПО «Кристалл» (URL : [crystaltherm.com/ru/production](http://crystaltherm.com/ru/production)) или аналогичные производства ОАО «Корпорация НПО «РИФ» (URL : [deu.rifcorp.ru](http://deu.rifcorp.ru)).

В качестве примера на рис. 3 показаны зависимости предельных значений тепловых сопротивлений радиаторов (теплоотводов) от величины температурного перепада между окружающей средой и охлаждаемой поверхностью датчика для трех ТЭМ, паспортные данные которых приведены в табл. 1. Температура стабилизации принималась равной 20°C, а мощность тепловыделения в датчике  $P_{Т1} = 0,25$  Вт.

Таблица 1

**Характеристики термоэлектрических модулей ООО НПО «Кристалл»**

Наименование	$I_x$ , А	$Q_x$ , Вт	$\Delta T_m$ , К	$R$ , Ом	Размер контактной площадки, мм	Тип ТЭМ
ТЭМ 1	8,0	14,9	99	0,9	44×44	Multistage
ТЭМ 2	6,1	1,8	122	0,87	36,3×36,3	Multistage
ТЭМ 3	4,3	5,6	85	0,76	20×20	Multistage

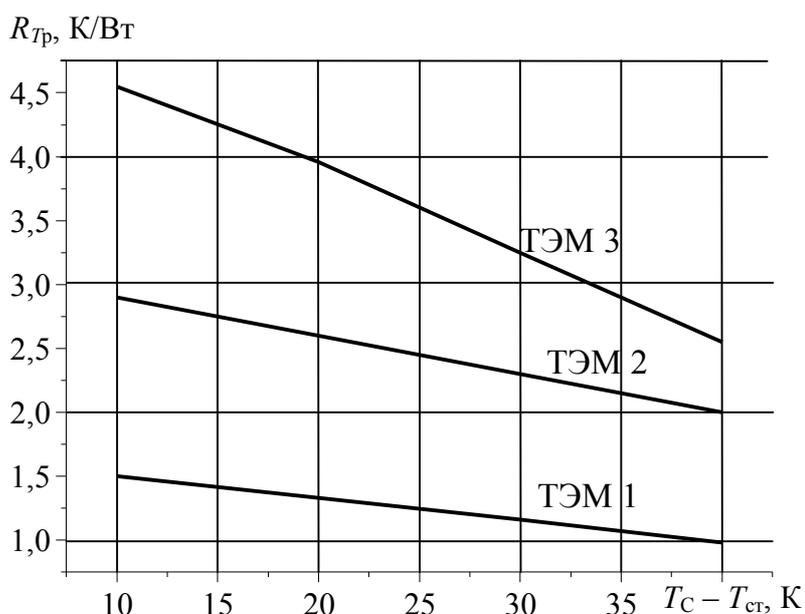


Рис. 3. Зависимость максимально возможного значения теплового сопротивления радиатора от температурного перепада между окружающей средой и термостатируемой поверхностью датчика для трех типов ТЭМ

С помощью (5) также можно определить требуемое тепловое сопротивление радиатора в зависимости от величины тепловой мощности, отводимой от охлаждаемого устройства, при заданных температурах стабилизации и окружающей среды.

Корпус рассматриваемого датчика магнитного поля выполнен из дюраля. Рассчитанное с помощью [9–12] среднее тепловое сопротивление датчика (от области электронной схемы до охлаждаемой поверхности) составляет 3,35 К/Вт. Поэтому средний перегрев поверхности электронной платы относительно охлаждаемой поверхности не превышает 0,85 К.

В силу высокой теплопроводности дюраля температура магнита системы подмагничивания равна средней температуре корпуса датчика, поэтому перегрев магнита относительно охлаждаемой поверхности датчика для собственного тепловыделения 0,25 Вт не превышает 0,11 К. Перегрев ЖИГ-сферы будет несколько выше (0,44 К).

Таким образом, ЖИГ-сфера и магнит системы подмагничивания при работе датчика имеют практически одинаковую температуру, мало отличающуюся от температуры охлаждаемой поверхности. Следовательно, вклад времени разогрева датчика за счет собственного тепловыделения во время тепловой готовности можно не учитывать. Основной вклад во время тепловой готовности вносит время тепловой стабилизации датчика при изменении температуры охлаждающей датчик поверхности ТЭМ.

В качестве соответствующего примера на рис. 4 показано рассчитанное изменение во времени температуры датчика в месте расположения магнита при скачкообразном изменении температуры холодной грани ТЭМ от 22 до 32°С (кривая 1) и от 2 до 42°С (кривая 2).

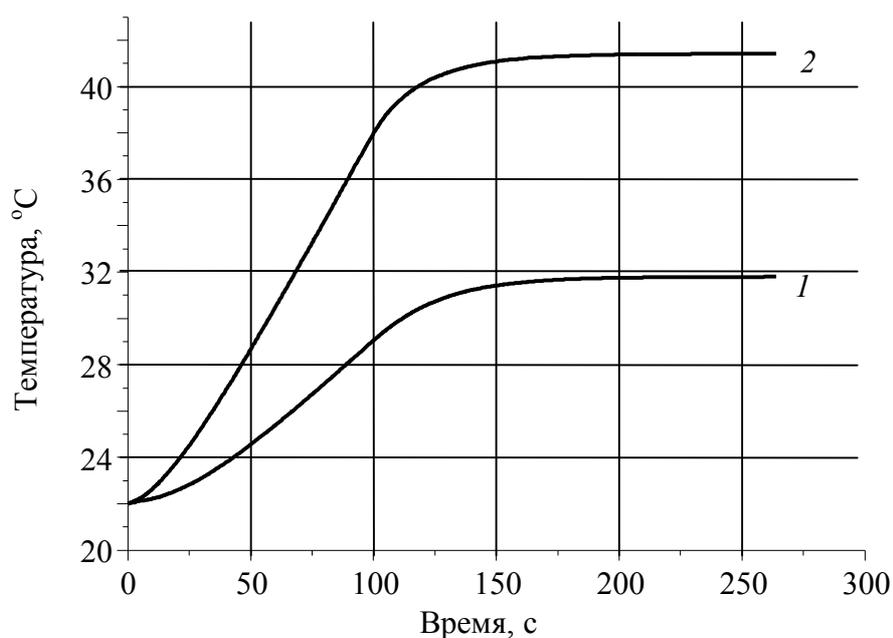


Рис. 4. Изменение во времени температуры корпуса датчика при резком увеличении температуры теплоотводящей поверхности: 1 – на 10°С; 2 – на 20°С

Как видно, время тепловой стабилизации датчика в этих случаях составляет около 180 с. Расчет проводился численно на основе модели датчика, показанной на рис. 2, с помощью программного комплекса *ANSYS*. Отметим, что аналитический расчет времени тепловой стабилизации датчика на основе метода регулярного теплового режима [13] дает несколько больший результат – 225 с.

Таким образом, если позволяют масс-габаритные показатели и требуемые энергетические затраты, использование термоэлектрических модулей для термостабилизации гетеромагнитных датчиков магнитного поля вполне оправданно, а приведенная выше простая методика оценки эффективности используемых в этих целях ТЭМ дает возможность оптимизации конструкции в условиях повышенной температуры среды.

Требования адиабатической изоляции термостабилизируемого датчика и минимизации всех промежуточных тепловых сопротивлений являются обязательными. При этом, как показывают результаты расчетов, для термостабилизации устройства с небольшим собственным тепловыделением ТЭМ не обязательно должен иметь максимальные  $\Delta T_m$  и  $Q_x$ . В первую очередь желательно рассматривать использование таких стандартных ТЭМ, генерация собственного тепла в которых минимальна.

Использование ТЭМ в инверсном режиме для термостабилизации электронного устройства в условиях низких температур окружающей среды требует отдельного рассмотрения, поскольку радиатор приходится исключить из процесса теплообмена.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 380 с.
2. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Гетеромагнитная микроэлектроника : микро-системы активного типа. М. : Наука, 2007. 612 с.
3. *Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш.* Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М. : Сов. радио, 1975. 360 с.
4. *Миткевич А. В.* Стабильность постоянных магнитов. М. : Энергия, 1971. 127 с.
5. Постоянные магниты : справочник / под ред. Ю. М. Пятина. М. : Энергия, 1971. 486 с.
6. *Евграфов А. А., Игнатъев А. А., Ретунский А. С., Спиридонов Д. М.* Сравнение основных характеристик аналогового и цифрового датчиков температуры // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2013. Вып. 14 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 4–13.
7. Термоэлементы и термоэлектрические устройства : справочник / Л. И. Анатичук. Киев : Наук. думка, 1979. 768 с.
8. *Зорин И. В., Зорина З. П.* Термоэлектрические холодильники и генераторы. Л. : Энергия, 1973. 136 с.
9. *Овчинников С. В., Ляшенко А. В.* Обобщенная модель для аналитического расчета температурных полей и тепловых сопротивлений элементов твердотельной радиоэлектроники // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2012. Вып. 12 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 11–18.

10. Овчинников С. В., Солопов А. А. Формулы для аналитического расчета тепловых сопротивлений цилиндрических элементов твердотельной радиоэлектроники с локализованным тепловыделением // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 32–37.

11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610993 Российская Федерация. Программа расчета стационарного теплового сопротивления многослойных конструктивных элементов мощного магнитоэлектронного транзистора с прямоугольной формой / заявители Овчинников С. В., Самолданов В. Н., Ляшенко А. В., Солопов А. А. ; правообладатель ОАО «Тантал». – № 2004610421 ; заявл. 26.02.2004 ; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.04.2004.

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610986 Российская Федерация. Программа расчета стационарного теплового сопротивления конструктивных элементов мощного магнитоэлектронного транзистора в виде многослойного цилиндра / Овчинников С. В., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. А. ; правообладатель ОАО «Тантал». – № 2004610414 ; заявл. 26.02.2004 ; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.04.04.

13. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л. : Энергия, 1968. 360 с.

УДК 537.622.4, 53.082.78

## **МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА В НЕНАСЫЩЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ**

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

Саратовский государственный университет  
Россия, 410041, Саратов, Астраханская, 83  
E-mail: khvalin63@mail.ru

Известно, что в пленках железоиттриевого граната с кристаллографическими индексами [111] и [110] даже при отсутствии внешних магнитных полей существуют макродоменные области, имеющие векторы намагниченности, ориентированные вдоль одной из осей легкого намагничивания. Авторами предложен метод анализа доменных структур, приведены результаты исследования магнитных свойств пленок железо-иттриевого граната в ненасыщенных состояниях. Такие структуры могут применяться при создании пленочных резонаторов, не требующих использования дополнительной системы подмагничивания.

*Ключевые слова:* железоиттриевый гранат, ось легкого намагничивания, доменная граница по Неелю и Блоху, резонатор.

## **Magnetic Properties of Iron Garnet Films in Unsaturated Conditions**

**A. V. Lyashenko, A. L. Khvalin, L. S. Sotov**

It is known that the iron garnet films with crystallographic indexes the [111] and [110], even in the absence of external magnetic fields exist macrodomain area having a magnetization vector oriented along one of the axes of easy magnetization. In this paper, based on the analysis

method proposed by the authors of domain structures, the magnetic properties of the films of iron-garnet in unsaturated conditions. Such structures can be used to create the film resonators that do not require the use of additional system bias.

*Key words:* iron garnet, easy magnetization axis, domain wall by Neel and Bloch, resonator.

Пленочные резонаторы из железиттриевого граната (ЖИГ) широко используются в магнитоуправляемых устройствах, поскольку они компактны, технологичны и легко совмещаются с полупроводниковым кристаллом в одном корпусе. Представляет практический интерес использование резонаторов в ненасыщенном режиме (в слабых магнитных полях), поскольку при этом существенно упрощается (или вообще исключается) дополнительная система подмагничивания, что улучшает масс-габаритные характеристики магнитоуправляемых устройств. Однако в таких режимах ЖИГ имеет микродоменную структуру, что существенно усложняет решение задачи анализа.

В работах [1–7] на примере решения известной задачи анализа доменной границы между двумя доменами 1 и 2 (рис. 1) предложен метод анализа доменных структур различных типов в пленках ЖИГ с использованием понятия магнитного диполя. В соответствии с данным методом исследуемый объем пленки ЖИГ (см. рис. 1) разбивается трехмерной сеткой на  $N$  элементарных объемов с координатами  $x(i), y(i), z(i)$ , где  $i$  изменяется в пределах от 1 до  $N$ , и размерами  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ .

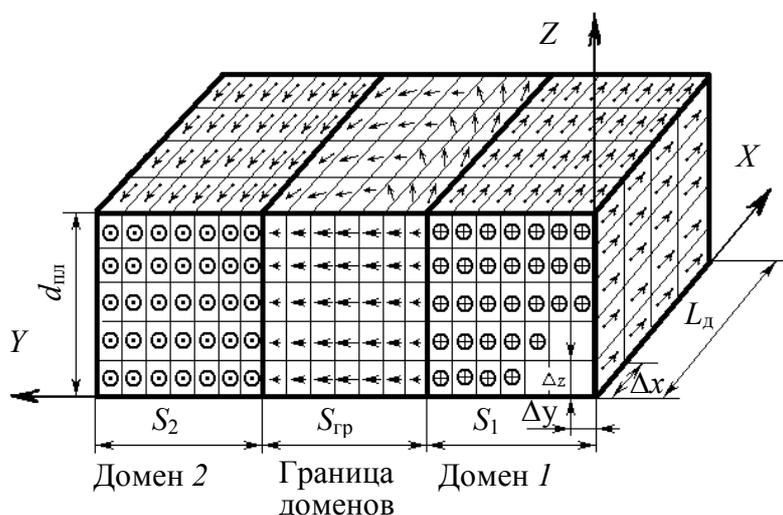


Рис. 1. Разбиение доменов ( $S_1$  и  $S_2$ ) и доменной границы ( $S_{гр}$ ) на элементарные объемы ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )

Полагаем, что ось легкого намагничивания (ОЛН) направлена вдоль оси  $X$ . В доменах 1 и 2 векторы  $\mathbf{M}_i$  магнитных моментов элементарных объемов (магнитные диполи) направлены в противоположные стороны вдоль ОЛН, т. е. на общей границе доменов возникает 180-градусный поворот вектора намагниченности (180-градусная доменная граница). В зависимости от направления поворота вектора намагниченности большинство исследователей рассматривают два основных типа доменных границ (ДГ) – по Неелю и Блоху.

При создании модели ДГ учитывались следующие виды энергии: магнитостатическая, обменного взаимодействия и магнитной анизотропии. Скалярный магнитостатический потенциал  $\Psi_i$ , созданный  $i$ -м магнитным диполем в заданной точке наблюдения, выражается следующим образом:

$$\Psi_i = \frac{M_i}{\Delta X} \left( \frac{1}{R_{i2}} - \frac{1}{R_{i1}} \right),$$

где  $R_{i1}$  и  $R_{i2}$  – расстояния от магнитных зарядов, составляющих магнитный диполь, до точки наблюдения.

Магнитостатический потенциал  $\Psi$  в месте расположения  $i$ -го диполя ДГ определяется суммой потенциалов, создаваемых всеми остальными диполями границы и доменами 1 и 2. Функция  $\Psi$  позволяет найти три компоненты вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  в элементарном объеме. Для их определения воспользуемся выражением, связывающим  $\mathbf{H}$  со скалярным магнитостатическим потенциалом  $\Psi$ :

$$\mathbf{H} = -\text{grad}\Psi.$$

Магнитостатическая энергия ( $W_{\text{мс}}$ ) ДГ равна сумме энергий отдельных диполей в магнитном поле, создаваемом доменами 1, 2 и всеми остальными диполями ДГ (соответствующие индексы опущены):

$$W_{\text{мс}} = -0,5 \cdot \sum (M_x \cdot H_x + M_y \cdot H_y + M_z \cdot H_z),$$

где  $M_x, M_y, M_z, H_x, H_y, H_z$  – компоненты векторов  $\mathbf{M}, \mathbf{H}$  вдоль осей  $X, Y, Z$  (см. рис. 1).

Объемная плотность энергии магнитной анизотропии  $\omega_A$  для кубического кристалла определяется следующим образом [3, 7]:

$$\omega_A = K_1 \cdot (\alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \cdot \alpha_1^2) = K_1 \cdot 0,5 \cdot (1 - \alpha_1^4 - \alpha_2^4 - \alpha_3^4),$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – косинусы направляющих углов вектора магнитного момента с ОЛН (поскольку рассматриваем одноосный кристалл,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  полагаем равными нулю);  $K_1$  – константа магнитной анизотропии.

Абсолютная величина энергии анизотропии  $W_A$  ДГ определяется путем суммирования по всем элементарным объемам:

$$W_A = \sum \omega_{Ai} \Delta x \Delta y \Delta z.$$

Объемная плотность энергии обменного взаимодействия  $\omega_{\text{об}}$  для кубического кристалла определяется следующим образом [7]:

$$\omega_{об} = A \cdot [(\nabla\alpha_1)^2 + (\nabla\alpha_2)^2 + (\nabla\alpha_3)^2],$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона в декартовой системе координат;  $A$  – константа обменного взаимодействия.

Абсолютная величина энергии обменного взаимодействия ДГ определяется путем суммирования по всем элементарным объемам:

$$W_{об} = \sum \omega_{об.j} \Delta x \Delta y \Delta z .$$

Таким образом, полная энергия ДГ определяется суммой трех видов энергий:

$$W = W_{мс} + W_A + W_{об},$$

а поверхностная плотность энергии ДГ рассчитывается по формуле

$$\omega = \frac{W}{L_d \cdot d_{пл}} .$$

На основе решения одномерной задачи оптимизации  $\min \omega_1(S_{гр})$  при варьировании толщины ДГ ( $S_{гр}$ ) определяется значение толщины, соответствующее минимуму плотности энергии (т. е. целевой функции)  $\omega_1$ .

В [3] приведены относительные плотности энергии и относительные толщины ДГ по Неелю и Блоху в зависимости от относительной толщины пленки ЖИГ, которые согласуются с результатами известной монографии [8] и подтверждают достоверность предложенного метода анализа, на основе которого проведено моделирование магнитной микроструктуры полосовых доменов в пленках ЖИГ.

Фотография ПДС, полученная экспериментально с помощью магнитооптического метода в НИИ материаловедения (г. Зеленоград), показана на рис. 2.

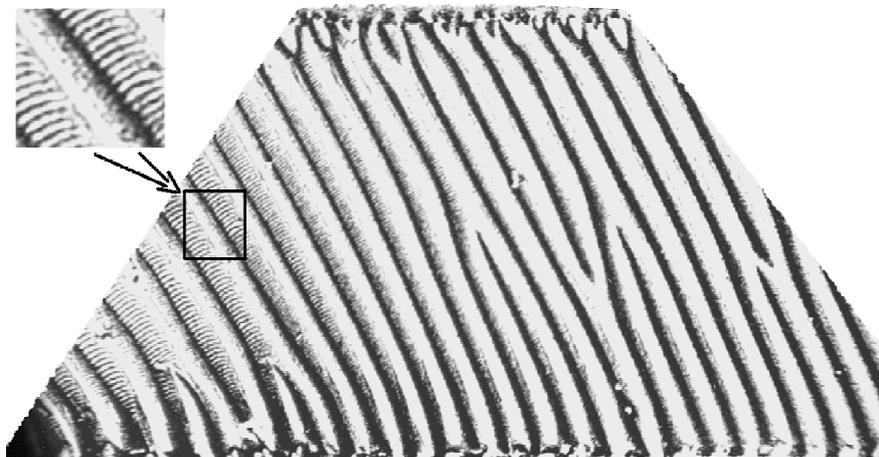


Рис. 2. Фотография полосовой доменной структуры в пленке ЖИГ толщиной 10 мкм

Следует обратить внимание на тонкую структуру (ТС) ПДС, которая проявляется в виде тонких темных поперечных полос на светлом фоне ПДС и, очевидно, связана с наличием микродоменов, имеющих различные нормальные составляющие векторов намагниченности.

Исследование ТС имеет важное практическое значение, поскольку позволяет объяснить магнитную микроструктуру ПДС и уточнить параметры ПДС при проектировании ряда устройств (резонаторов, фильтров, подавителей шума и пр.).

В [9] предложено объяснение появления ТС, которое сводится к влиянию дислокаций в кристалле ЖИГ и наведенной (ростовой) анизотропии. Однако теоретическая модель этого явления отсутствует.

Предлагаемая в настоящей статье модель ТС ПДС получена на основе решения задач анализа и синтеза распределения векторов намагниченности в ПДС. Модель ТС ПДС позволяет объяснить появление ТС в рамках предложенной модели ПДС.

Для решения задачи анализа ПДС представляется в виде системы магнитных диполей (векторов магнитных моментов в соответствующих элементарных объемах). Порядковый номер элементарного объема при разбиении ДС на элементы вдоль осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  задается с помощью индексов  $i, j, k$  ( $i = \overline{1, N_x}$ ;  $j = \overline{1, N_y}$ ;  $k = \overline{1, N_z}$ ) соответственно. Вектор магнитного момента  $\mathbf{M}$  элементарного объема показан на рис. 3.

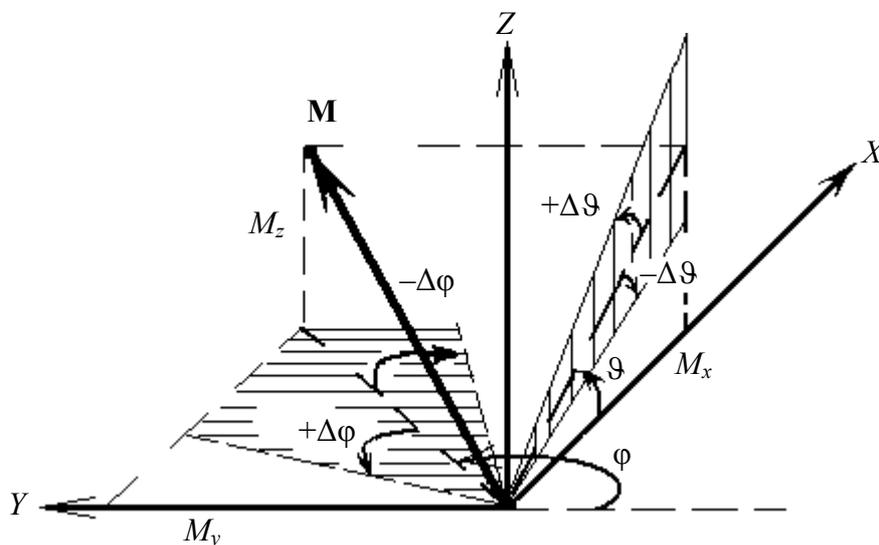


Рис. 3. Магнитный момент  $\mathbf{M}$  элементарного объема

Ориентация векторов  $\mathbf{M}_{ijk}$  в микродоменах (элементарных объемах, см. рис.1) задается с помощью углов (азимутального  $\varphi(i, j, k)$  и полярного  $\vartheta(i, j, k)$ , см. рис. 3) и выбирается из общезначимых рассуждений, представленных в ряде классических работ [8–10].

Для выявления тенденций в эволюции доменной структуры при изменении толщины пленки необходимо решить задачу оптимизации микродоменной структуры ПДС, т. е. найти закономерности в распределении

векторов магнитных моментов при независимом изменении азимутального  $\varphi(i, j, k)$  и полярного  $\vartheta(i, j, k)$  углов в каждом элементарном объеме, входящем в состав ДС.

Задача оптимизации решается методом случайного поиска и формулируется следующим образом. В каждом микродомене для каждого набора индексов  $(i, j, k)$  поочередно и независимо от других изменяются азимутальный  $\varphi(i, j, k)$  и полярный  $\vartheta(i, j, k)$  углы соответствующего вектора магнитного момента. Затем решается задача анализа измененной ДС и определяется значение целевой функции (полной энергии ДС). Необходимо для различных значений толщины пленки ЖИГ найти оптимальное распределение векторов магнитных моментов в элементарных объемах ДС, соответствующее минимуму целевой функции, представляющей собой объемную плотность энергии в доменной структуре:

$$\min \omega_2(W_d, L_d, \varphi(i, j, k), \vartheta(i, j, k)).$$

Задача оптимизации распределений магнитных моментов в ДС решена для пленок ЖИГ с намагниченностью насыщения  $4\pi M_s = 1759$  Гс в широком диапазоне толщин: от  $d_1 = 5,0$  мкм до относительно толстых пленок ( $d_2 = 50,0$  мкм). Типичные распределения векторов магнитных моментов в элементарных объемах в средних сечениях ДС (в плоскостях  $XOZ$  и  $XOY$ ), полученные в результате решения задачи оптимизации, представлены на рис. 4. Видно, что при перемещении вдоль полосового домена векторы намагниченности имеют периодические отклонения от исходного направления (оси  $OX$ ) в азимутальной и полярной плоскостях.

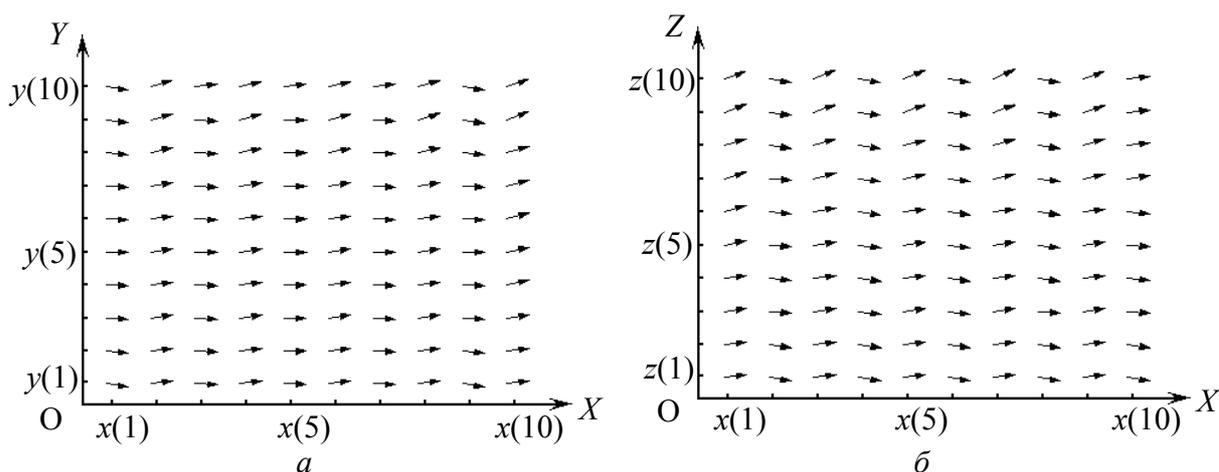


Рис. 4. Результаты решения задачи оптимизации направлений векторов магнитных моментов в центральных сечениях полосового домена для пленки ЖИГ толщиной 30,0 мкм:  $a$  – сечение пленки в плоскости  $z(5)$ ;  $b$  – сечение пленки в плоскости  $y(5)$

Приведенные результаты позволяют сделать следующий вывод. Наблюдаемая в эксперименте строгая периодичность ТС, кроме дислокаций кристаллической решетки и наведенной анизотропии, может быть объясне-

на энергетически выгодными периодическими отклонениями векторов намагниченности в азимутальной и полярной плоскостях в направлении вдоль полосовых доменов.

В результате проведенных исследований авторами предложена модель микродоменной структуры (рис. 5) [7].

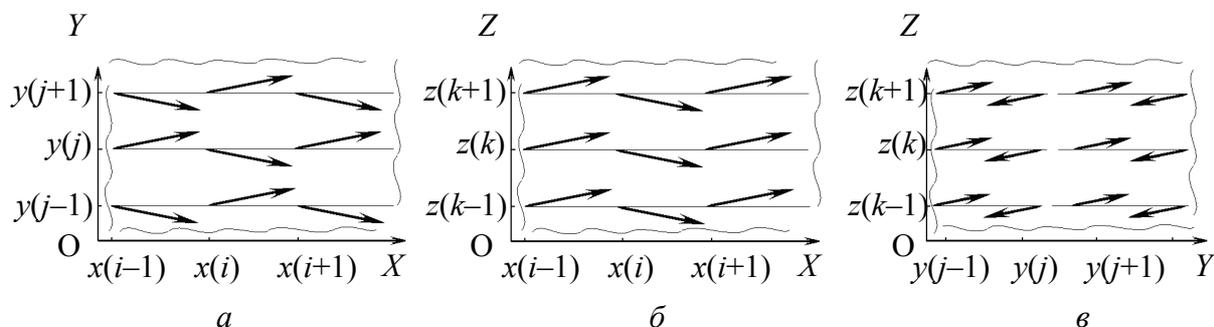


Рис. 5. Проекция векторов магнитных моментов в сечениях ДС в плоскостях: *a* –  $XOY$ ; *б* –  $XOZ$ ; *в* –  $ZOY$

Распределение векторов намагниченности в традиционной модели ПДС [10], которая предполагает отклонение векторов магнитных моментов от оси  $OX$  только в плоскости  $ZOX$ , показано на рис. 6.

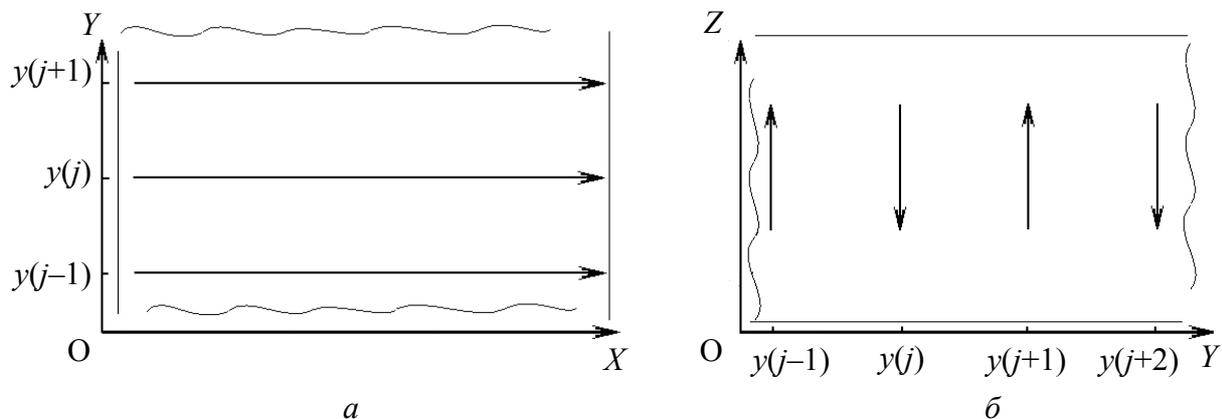


Рис. 6. Проекция векторов магнитных моментов в сечениях ДС в традиционной модели ПДС (по [10]) в плоскостях: *a* –  $XOY$ ; *б* –  $ZOY$ . Стрелками показаны направления магнитных моментов в соседних полосовых доменах

Вне пленки ЖИГ при этом должны появиться нескомпенсированные магнитные поля в направлении оси  $OY$ , приводящие к увеличению полной магнитной энергии ПДС (см. рис. 6). Результаты численных экспериментов по предложенной модели и качественные рассуждения на основе решения задач оптимизации (см. рис. 4) позволяют сделать вывод о необходимости введения чередующихся отклонений векторов магнитных моментов в микродоменах от оси  $OX$  в обеих плоскостях ( $ZOX$  и  $XOY$ ).

Поскольку в предложенной модели (см. рис. 5) поперечные составляющие векторов намагниченности в соседних микродоменах компенсируют друг друга внутри объема пленки ЖИГ, магнитные поля микродоменов не выходят за пределы пленки и не увеличивают магнитостатическую энергию.

Таким образом, сравнительный анализ моделей ПДС показывает, что предложенная модель, в отличие от традиционной (см. рис. 6), в большей степени соответствует общим представлениям о стремлении физических систем к переходу в состояние с минимальной энергией.

Пространственное распределение магнитостатических зарядов в традиционной и предложенной моделях ПДС показано на рис. 7.

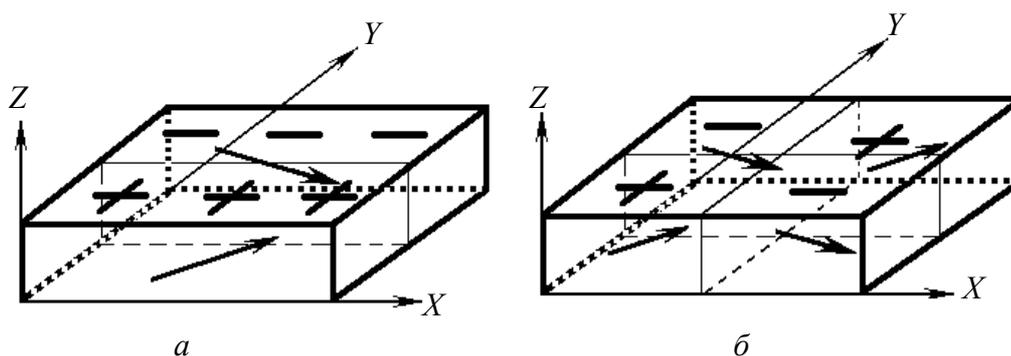


Рис. 7. Распределение магнитостатических зарядов в моделях ПДС (показаны знаками «+» и «-»): *a* – по [10]; *б* – по предложенной модели. Стрелками показаны направления магнитных моментов в соседних микродоменах

Традиционная модель [10] предполагает отклонение векторов магнитных моментов от оси  $Ox$  только в плоскости  $ZOx$ . Однако из рис. 7, *a* видно, что на поверхности пленки ЖИГ при этом должны появиться некомпенсированные магнитостатические заряды, создающие дополнительное магнитное поле в направлении оси  $Oy$ , что не учитывается в модели [10]. Результаты численных экспериментов по предложенной модели и качественные рассуждения на основе рис. 5 позволяют сделать вывод о необходимости введения чередующихся отклонений векторов магнитных моментов в микродоменах от оси  $Ox$  в обеих плоскостях –  $ZOx$  и  $XOy$ . Как видно из рис. 7, *б*, при этом на поверхностях пленки ЖИГ возникают магнитостатические заряды чередующихся знаков, что, очевидно, приводит к уменьшению магнитостатической энергии ПДС.

Таким образом, азимутальный  $\varphi$  и полярный  $\vartheta$  углы в микродоменах определяются следующим образом:

$$\varphi(i, j, k) = \pi/2 + (-1)^{(i+j+k)} \cdot \Delta\varphi;$$

$$\vartheta(i, j, k) = (-1)^{(i+j+k)} \cdot \Delta\vartheta.$$

На основе предложенной модели ПДС для различных значений толщины пленки ЖИГ решены задачи оптимизации по определению оптимальных параметров «тонкой структуры» ПДС, соответствующих минимуму целевой функции, т. е. объемной плотности энергии в доменной структуре:

$$\min \omega_3(W_d, L_d, \varphi(i, j, k), \vartheta(i, j, k)).$$

Ниже приведены результаты теоретических исследований предложенной модели ДС [7]. Следует отметить, что оптимальные значения углов  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\vartheta$  достаточно сильно отклоняются от исходного направления – оси  $OX$ . Для исследованного диапазона толщин пленок ЖИГ азимутальные углы  $\Delta\varphi$  имеют величину порядка  $10^\circ$ . При увеличении толщины пленки (от 5 до 50 мкм) полярная составляющая увеличивается. Соответствующие численные значения приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты оптимизации микродоменной структуры для различных значений толщины пленки ЖИГ по модели [7]**

$d$ , мкм	$W_d$ , мкм	$L_d$ , мкм	$\Delta\varphi$ , град	$\Delta\vartheta$ , град
5,000	0,4748	0,0472	10,764	2,025
10,000	0,6649	0,0675	10,526	3,897
15,000	0,8135	0,0827	10,526	4,875
20,000	0,9478	0,0947	10,607	6,723
30,000	1,1378	0,1181	10,607	9,136
40,000	1,3284	0,1351	10,764	11,378

Представленные в табл. 1 результаты подтверждаются данными [9] экспериментального наблюдения тонкой структуры ПДС в пленках ЖИГ толщиной 5–10 мкм и выше. Как видно из табл. 1, в таких пленках углы наклона  $\Delta\vartheta$  векторов магнитных моментов в микродоменах к плоскости  $XOY$  увеличиваются по сравнению с субмикронными пленками, что позволяет визуально наблюдать ТС с помощью магнитооптических методов.

В соответствии с предложенной моделью ПДС в пленке ЖИГ предполагается наличие двух магнитных фаз (рис. 8) с векторами магнитных моментов  $\mathbf{M}_1$  и  $\mathbf{M}_2$  (модуль которых равен  $M_s$  – намагниченности насыщения ЖИГ), имеющих симметричные относительно оси  $OX$  отклонения в азимутальной и полярной плоскостях.

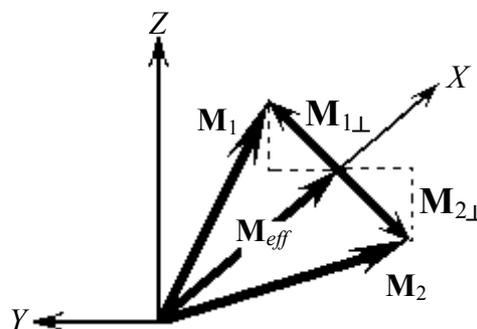


Рис. 8. Векторы магнитных моментов в соседних микродоменах и вектор эффективной намагниченности образца ЖИГ

Так как поперечные составляющие векторов магнитных моментов  $\mathbf{M}_{1\perp}$  и  $\mathbf{M}_{2\perp}$  одинаковы по модулю и противоположны по направлению, то они взаимно компенсируют друг друга в объеме всего образца пленки ЖИГ (резонатора).

В связи с наличием магнитной доменной микроструктуры резонатора результирующая намагниченность его определяется значением эффективной намагниченности  $\mathbf{M}_{eff}$ . В результате решения задач оптимизации по определению основных параметров микродоменной структуры пленки ЖИГ (см. табл. 1) можно определить  $\mathbf{M}_{eff}$  в зависимости от толщины пленки. Соответствующие численные значения представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Эффективная намагниченность  $4\pi M_{eff}$  ЖИГ резонатора в зависимости от толщины  $d$  пленки**

$d$ , мкм	$4\pi M_{eff}$ , Гс
5,000	1727,00
10,000	1725,53
15,000	1723,35
20,000	1717,45
30,000	1707,74
40,000	1695,23
50,000	1672,13

Проведенные исследования показали, что в ненасыщенных состояниях пленок ЖИГ тонкая структура полосовых доменов, наблюдаемая экспериментально, вызвана периодическими отклонениями векторов намагниченности от плоскости пленки, что позволяет создать модель полосовых доменов и определить значение эффективной намагниченности ферритового резонатора в слабых магнитных полях [11].

Использование ЖИГ-резонаторов в ненасыщенном режиме позволяет создать магнитоуправляемые устройства с относительно низкими рабочими частотами (до 1 ГГц) и малыми величинами индукции управляющего магнитного поля для использования, например, в задачах магнитной навигации и дефектоскопии, измерителях слабых магнитных полей и пр. [12–16].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хвалин А. Л. Метод поверхностной магнитной проницаемости в решении задачи анализа слоистых ферритосодержащих структур // Вестн. Тихоокеанского гос. ун-та. 2009. № 4(15). С. 25–30.
2. Хвалин А. Л. Дисперсионные соотношения для слоистых ферритосодержащих структур в прямоугольном волноводе // Вестн. Тихоокеанского гос. ун-та. 2010. № 1(16). С. 73–80.
3. Хвалин А. Л. Магнитостатические модели 180-градусных доменных границ в одноосных пленках ЖИГ // Антенны. 2011. № 11. С. 4–14.

4. *Хвалин А. Л.* Моделирование магнитной микроструктуры полосовых доменов в пленках ЖИГ // 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. 4–14.
5. *Хвалин А. Л.* Использование свойств полосовых доменов в пленочных ЖИГ-резонаторах для создания двухкомпонентного магнитометра слабых магнитных полей // Вопр. электромеханики : тр. ВНИИЭМ. 2012. Т. 129, № 4. С. 49–52.
6. *Хвалин А. Л.* Распределение намагниченности в «тонкой структуре» полосовых доменов в пленках железиттриевого граната // Вопр. электромеханики : тр. ВНИИЭМ. 2012. Т. 129, № 4. С. 49–52.
7. *Хвалин А. Л.* Обобщенная модель магнитной микроструктуры полосовых доменов в пленках железиттриевого граната // Вестн. Тихоокеанского гос. ун-та. 2013. № 1(28). С. 35–44.
8. *Филиппов Б. Н., Танкеев А. П.* Динамические эффекты в ферромагнетиках с доменной структурой. М. : Наука, 1987. 216 с.
9. *Вашиковский А. В., Локк Э. Г., Щеглов В. И.* Влияние наведенной одноосной анизотропии на доменную структуру и фазовые переходы пленок железиттриевого граната // Физика твердого тела. 1999. Т. 41, № 11. С. 2034–2041.
10. *Тикадзуми С.* Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М. : Мир, 1987. 419 с.
11. *Хвалин А. Л., Солопов А. А., Ляшенко А. В.* Исследование СВЧ-резонаторов на эпитаксиальных структурах ЖИГ с учетом доменной структуры // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2012. Вып. 12 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 4–11.
12. *Хвалин А. Л., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Васильев А. В., Самолданов В. Н.* Электродинамическое моделирование СВЧ-усилителей с гетеромагнитным управлением // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 99–105.
13. *Самолданов В. Н., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. А., Хвалин А. Л., Маринин А. В., Коваленко М. Л.* Компьютерное моделирование ферритовых резонаторов во внутренних цепях биполярного транзистора в усилительном режиме работы // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 1 : Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. С. 110–118.
14. *Хвалин А. Л.* Физические принципы моделирования полевых транзисторов в УВЧ-диапазоне // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. трудов. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 59–67.
15. *Хвалин А. Л., Самолданов В. Н.* Моделирование магнитоэлектронных элементов связи в среде Microwave Office-2007 // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 49–58.
16. *Хвалин А. Л.* Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Поволжская гос. академия телекоммуникаций и информатики. Самара, 2014. 32 с.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗОН В СТРУКТУРЕ ДВУХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ ОТНОСИТЕЛЬНО ДРУГ ДРУГА

**М. А. Морозова, А. Ю. Шараевская**

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

Построена модель для расчета дисперсионных характеристик магнитостатических волн в периодической структуре, состоящей из двух одномерных магнонных кристаллов, периоды которых сдвинуты относительно друг друга в направлении распространения волны. Впервые показано, что в зависимости от величины сдвига между магнонными кристаллами в такой структуре возможно формирование до трех запрещенных зон в полосе первого брэгговского резонанса.

Полученные результаты могут быть использованы для эффективного управления характеристиками запрещенных зон в периодических структурах на основе таких магнонных кристаллов.

*Ключевые слова:* магнонный кристалл, магнитостатическая волна, дисперсионная характеристика, запрещенная зона, связанные структуры.

### Features of Formation Band Gaps in Structure of two Magnonic Crystals with Phase Shift with Relation to Each Other

**M. A. Morozova, A. Yu. Sharaevskaya**

A model was developed for calculation of the dispersion characteristics of magnetostatic waves in the periodic structure, that consist of two one-dimensional magnonic crystals, periods of them are shifted with relation to each other in direction of wave propagation. The first to show on the characteristics, up to three band gaps may be formed in band of first Bragg resonance by depending on shift between magnonic crystals in such structure.

The results can be used for effectively control of characteristics of band gaps in periodic structures, that basis of magnonic crystals.

*Key words:* magnonic crystal, magnetostatic wave, dispersion characteristic, band gap, related structures.

В настоящее время большой интерес вызывают периодические структуры микронных или субмикронных размеров, сформированные на поверхности ферромагнитных пленок, – магнонные кристаллы (МК) [1–5]. В таких кристаллах распространяются спиновые волны (магноны). В отличие от фотонных кристаллов, которые используются в оптическом диапазоне [6], МК исследуются, в основном, в микроволновом диапазоне длин волн. Наличие пространственного периода в кристаллах приводит к возникновению в спектре спиновых волн запрещенных зон для длин волн, удовлетворяющих условию брэгговского резонанса [6]:

$$k_B^n = \frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{(2n-1)\pi}{L} \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (1)$$

где  $k_B^n$  и  $\lambda_n$  – брэгговское волновое число и длина волны соответственно;  $L$  – период структуры. В соответствии с (1) брэгговские частоты определяются соотношением  $\omega_B^n = k_B^n V_\phi$ , где  $V_\phi$  – фазовая скорость волны в структуре.

Наличие запрещенных зон (ЗЗ) в спектре спиновых волн позволяет создавать на основе магнетонных кристаллов перестраиваемые магнитным полем устройства для обработки и генерации сигналов в микроволновом диапазоне [7–9]. В этом случае актуальной является задача управления характеристиками (плотностью, шириной и др.) запрещенных зон в спектре распространяющихся волн. Для решения этой задачи в последние годы предлагались различные способы управления ЗЗ: переменным магнитным полем (динамический) [10, 11]; за счет изменения граничных условий [12] и др.

Авторами рассматривалась также возможность управления характеристиками запрещенных зон в спектре магнитоэлектронных волн за счет использования периодических структур в виде связанных магнетонных кристаллов (МК–МК) [13, 14]. Как известно [15], в случае двух связанных волноведущих ферромагнитных структур электродинамическая связь приводит к появлению быстрой и медленной волн, распространяющихся с различными групповыми и фазовыми скоростями, характеристики которых зависят от величины связи. В [13] было показано, что такая связь ведет к существенному изменению характера дисперсионных зависимостей в ферромагнитной структуре МК–МК по сравнению с одиночным МК. Это обстоятельство позволяет эффективно управлять спектральными характеристиками запрещенных зон (их положением и шириной) таких структур, изменяя величину связи между МК [14].

В настоящей работе впервые рассматривается модель для расчета дисперсионных характеристик магнитоэлектронных волн в периодической структуре, состоящей из двух магнетонных кристаллов, периоды которых сдвинуты относительно друг друга в направлении распространения волны. На основе этой модели проводится анализ влияния фазового сдвига на особенности формирования запрещенных зон в связанных МК.

### *Модель структуры и дисперсионное соотношение*

Рассмотрим структуру (рис. 1), состоящую из двух одинаковых магнетонных кристаллов (МК-1 и МК-2), разделенных диэлектрическим слоем  $D$ . В общем случае будем предполагать, что периоды в МК сдвинуты относительно друг друга в направлении распространения волн на величину  $\theta$ , как показано на рис. 1. Каждый из магнетонных кристаллов, в свою очередь, представляет собой ферромагнитную пленку с намагниченностью насыщения  $M_0$ , эффективная толщина пленки  $d_0$ , период структуры  $L$ . Предположим, что в направлении осей  $x$  и  $y$  структура бесконечна. Постоянное магнитное поле  $\mathbf{H}_0$  приложено перпендикулярно к поверхности пленки, и его величина выбрана таким образом, чтобы в пленке в направлении оси  $y$  распространялась прямая объемная магнитоэлектронная волна (ПОМЭВ) [8].

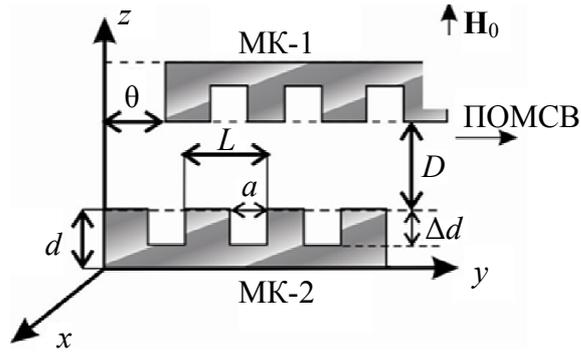


Рис. 1. Схема структуры, состоящей из двух одномерных МК

Если толщина ферромагнитной пленки является периодически меняющейся величиной (см. рис. 1), то ее можно разложить в ряд Фурье и, следуя [13], ограничиться только первыми тремя членами разложения. В этом случае для толщины пленок  $d_{1,2}$  в рассматриваемой структуре можно получить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} d_1 &= d_0 \left[ 1 + \delta d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{L} y\right) \right]; \\ d_2 &= d_0 \left[ 1 + \delta d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{L} y + \theta\right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta d = \frac{2\Delta d}{\pi d_0} \sin\left(\frac{\pi b}{L}\right)$  – параметр, зависящий от геометрических размеров структуры,  $b = L - a$  – ширина впадины;  $a$  – ширина выступа, индексы 1 и 2 относятся к МК-1 и МК-2 соответственно.

Используя метод анализа для получения дисперсионного соотношения, подробно изложенный в [13] и учитывающий только нулевые гармоники прямых волн и «-1» гармоники встречных волн в каждом из магнитных кристаллов в полосе первого брэгговского резонанса (1), представим общее решение волновых уравнений в МК-1 и МК-2 в виде

$$m = A_{1,2} e^{j(\omega t - k_+ y)} + B_{1,2} e^{j(\omega t - k_- y)}, \quad (3)$$

где  $A_{1,2}$  и  $B_{1,2}$  – амплитуды прямых и встречных волн соответственно;  $k_+$  – постоянная распространения нулевой гармоники;  $k_- = k_+ - \frac{2\pi}{L}$  – относится к «-1» гармонике;  $\omega$  – частота. С учетом выражений (2) и (3) и подставляя их в соответствующие волновые уравнения для МК-1 и МК-2 [13], получим следующую систему уравнений для амплитуд прямых и встречных волн:

$$\begin{cases}
-\omega^2 A_1 + \omega_H^2 A_1 + \beta k_+ (A_1 + KA_2) + \beta \frac{k_-^2}{k_+} \frac{\delta d}{2} (B_1 + KB_2) = 0, \\
-\omega^2 B_1 + \omega_H^2 B_1 + \beta k_- (B_1 + KB_2) + \beta \frac{k_+^2}{k_-} \frac{\delta d}{2} (A_1 + KA_2) = 0, \\
-\omega^2 A_2 + \omega_H^2 A_2 + \beta k_+ (A_2 + KA_1) + \beta \frac{k_-^2}{k_+} e^{-i(\frac{2\pi\theta}{L})} \frac{\delta d}{2} (KB_1 + B_2) = 0, \\
-\omega^2 B_2 + \omega_H^2 B_2 + \beta k_- (B_2 + KB_1) + \beta \frac{\delta d}{2} \frac{k_+^2}{k_-} e^{i(\frac{2\pi\theta}{L})} (KA_1 + A_2) = 0,
\end{cases} \quad (4)$$

где  $\omega_H = \gamma H_0$  – частота однородной прецессии вектора магнитного момента;  $\gamma$  – гиромагнитное отношение [15];  $\beta = \frac{\omega_H \omega_M d_0}{2}$ ;  $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$ ; – частота намагничивания, определяемая свойствами ферромагнетика. Приравнивая детерминант полученной системы к нулю, получим дисперсионное соотношение для волн в виде

$$\begin{pmatrix}
D_+ & \beta k_+ K & \delta_- & \delta_- K \\
\beta k_+ K & D_+ & \theta_- K & \theta_- \\
\delta_+ & \delta_+ K & D_- & \beta k_- K \\
\theta_+ K & \theta_+ & \beta k_- K & D_-
\end{pmatrix} = 0, \quad (5)$$

где  $D_{\pm} = -\omega^2 + \omega_H^2 + \beta k_{\pm}$ ,  $\delta_{\pm} = \beta \frac{k_{\pm}^2}{k_{\mp}} \frac{\delta d}{2}$ ,  $\theta_{\pm} = e^{\pm i(\psi)} \beta \frac{k_{\pm}^2}{k_{\mp}} \frac{\delta d}{2}$ ;  $\psi = \frac{2\pi}{L} \theta$  – фазовый сдвиг между МК. Диагональные компоненты определителя  $D_{\pm}$  в (5), приравненные к нулю, представляют собой дисперсионные соотношения для прямой и встречной МСВ в однородной пленке [15]. Недиagonальные компоненты, куда входит электродинамический коэффициент связи  $K \sim e^{\alpha D}$ , описывают связь между магнотными кристаллами,  $\delta_{\pm}$  – параметр связи между прямыми и встречными волнами в каждом МК,  $\theta_{\pm}$  зависит от фазового сдвига  $\psi$  между МК. Отметим, что при  $K \neq 0$  и  $\delta d = 0$  уравнение (5) описывает дисперсионное соотношение для ПОМСВ в структуре из двух связанных однородных пленок [15]. При  $K = 0$  и  $\delta d \neq 0$  в (5) приходим к дисперсионному уравнению для одного МК [13].

### Результаты расчета

Дисперсионные кривые для быстрой и медленной МСВ (сплошные кривые) в виде зависимости  $Re(k)$  от частоты  $\omega$  в первой зоне Бриллюэна ( $0 \leq kL \leq 2\pi$ ) приведены на рис. 2, а, б, в при разных значениях  $\psi$ , где  $k$  –

постоянная распространения МСВ. Огибающие внутри закрашенных областей при  $k = 0$  соответствуют мнимым частям  $Im(k)$ , описывающим зависимость величины затухания волны от частоты  $\omega$ .

В случае связанных однородных пленок ( $\delta d = 0$  и  $K \neq 0$ ), как известно [15], дисперсионная кривая для МСВ расщепляется на две нормальные моды, которым соответствуют быстрая и медленная волны в такой структуре. Дисперсионные характеристики для этих волн показаны пунктирными линиями на рис. 2, а, б, в: 1 – для быстрой прямой волны; 2 – для медленной прямой волны. Соответствующие характеристики для встречных волн обозначены 1' и 2'. Результаты расчета, которые соответствуют случаю, рассмотренному в [13] ( $\psi = 0$ ), приведены на рис. 2, а. В этом случае в спектре МСВ возникают две запрещенные зоны, соответствующие брэгговскому резонансу для быстрой (зона G-1) и медленной (зона G-2) волн при  $K = 0,5$ .

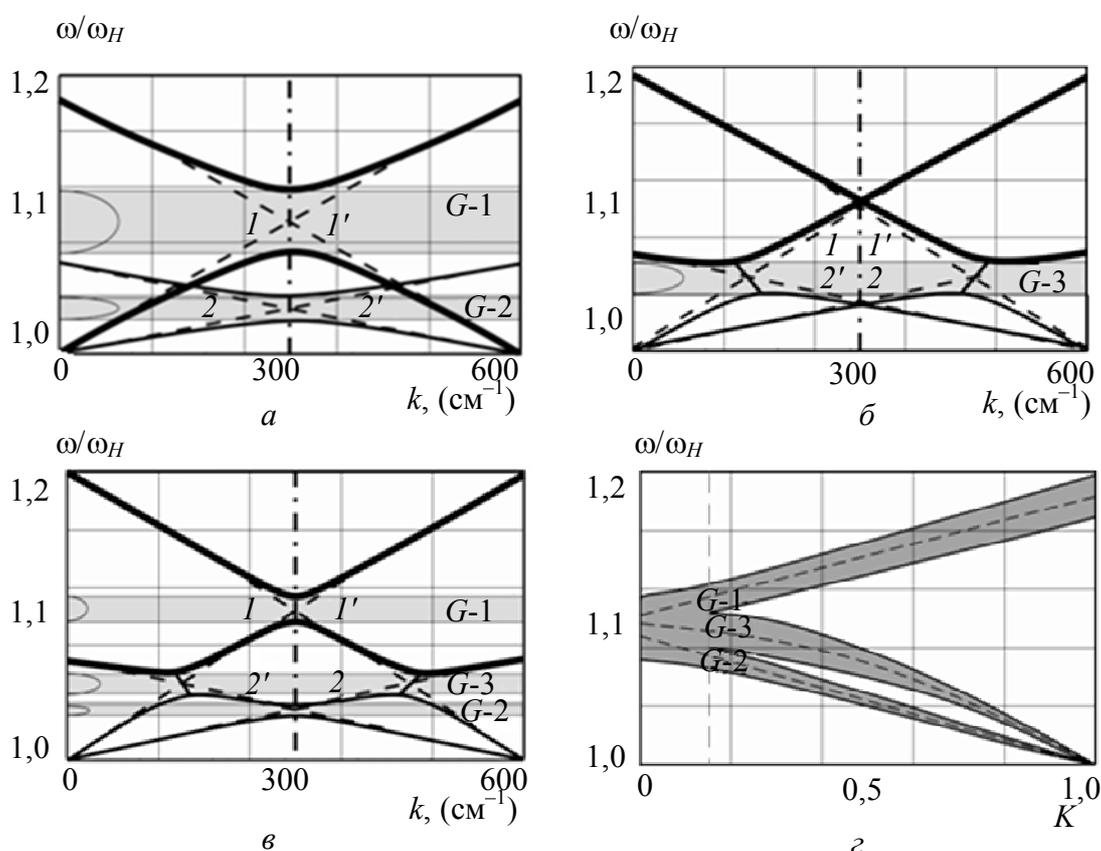


Рис. 2. Дисперсионные характеристики МСВ (для быстрой волны – толстые линии, для медленной – тонкие линии) в структуре двух связанных МК со сдвигом  $\psi$  при  $\delta d = 0,5$  и  $K = 0,5$ . Закрашенные участки соответствуют областям затухания МСВ: а –  $\psi = 0$ ; б –  $\psi = 0,5$ ; в –  $\psi = 0,7$ ; г – зависимость ширины запрещенных зон (G-1, G-2, G-3) от  $K$  (закрашенные области) и центральных частот от  $K$  (пунктирные линии) при  $\delta d = 0,5$  и  $\psi = 0,7$

В случае, когда сдвиг  $\psi = 0,5$ , на дисперсионных зависимостях присутствует только одна ЗЗ – G-3, что характеризует систему как один МК. Однако особенность заключается в том, что запрещенная зона в этом случае формируется не на частоте, соответствующей брэгговскому резонансу.

В случае, когда сдвиг равен 0,7 (см. рис. 2, в), на дисперсионной кривой присутствуют три ЗЗ ( $G-1$ ,  $G-2$ ,  $G-3$ ), причем зона  $G-3$  возникает также не на частоте брэгговского резонанса.

Зависимость ширины запрещенных зон для  $G-1$ ,  $G-2$ ,  $G-3$  от параметра связи  $K$  (закрашенные области) показана на рис. 2, г. Видно, что при увеличении  $K$  верхняя зона  $G-1$  сдвигается вверх по частоте и расширяется, а средняя  $G-3$  и нижняя  $G-2$  сужаются и сдвигаются вниз по частоте. Пунктирными линиями показано смещение центральных частот ЗЗ в зависимости от  $K$ . Таким образом, результаты, представленные на рис. 2, г, демонстрируют возможность управления характеристиками ЗЗ при изменении параметра связи  $K$ .

Зависимость ширины и положения запрещенных зон в спектре спиновых волн от параметра  $\psi$  приведена на рис. 3.

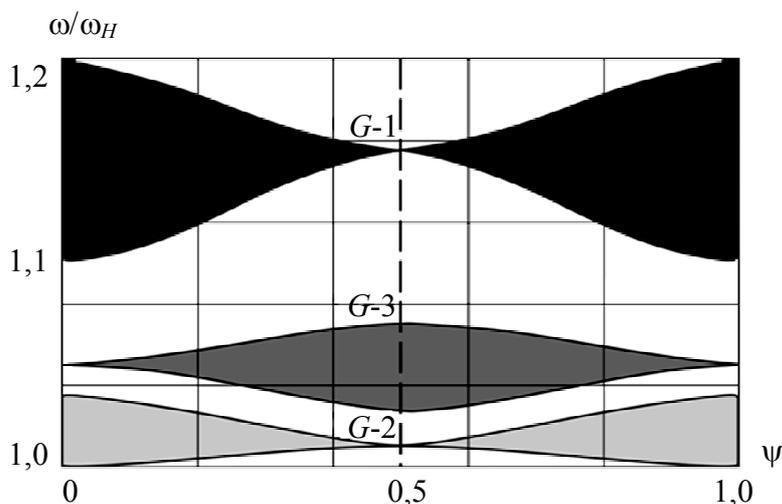


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенных зон от сдвига  $\psi$  между МК

Из приведенных результатов (см. рис. 3) следует, что при  $0 < \psi < 0,5$  в системе присутствуют все три ЗЗ ( $G-1$ ,  $G-2$ ,  $G-3$ ), верхняя  $G-1$  и нижняя  $G-2$  с ростом  $\psi$  сужаются, а средняя  $G-3$  расширяется. В диапазоне от  $0,5 < \psi < 1$  верхняя  $G-1$  и нижняя  $G-2$  зоны расширяются, а средняя  $G-3$  сужается. Таким образом, изменяя фазовый сдвиг между структурами, можно эффективно управлять характеристиками запрещенных зон (их количеством и шириной).

Полученные результаты позволяют рассматривать исследуемую структуру в виде двух связанных магнитных кристаллов как систему, в которой за счет двойного управления коэффициентом связи (величиной и фазой) существенно расширяется возможность управления запрещенными зонами. Последнее представляет интерес для разработки устройств обработки сигналов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-07-00273, 15-07-05901).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Животовский Л. В., Климов А. А., Тайад Ф., Преманес Л., Бонин К., Цай Ч. С., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А. Ферромагнитные пленки с периодическими структурами с магной запрещенной зоной – магные кристаллы // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, № 10. С. 670–674.
2. Nikitov S. A., Tsai C. S. Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2001. Vol. 236, № 3. P. 320–330.
3. Chumak A. V., Serga A. A., Hillebrands B., Kostylev M. P. Scattering of backward spin waves in a one-dimensional magnonic crystal // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 022508.
4. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics // J. of Phys. D. 2010. Vol. 43. P. 264001.
5. Serga A. A., Chumak A. V., Hillebrands B. YIG magnonics // J. Phys. D : Appl. Phys. 2010. Vol. 43. P. 264002.
6. Квишарь Ю. С., Агравал Г. П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М. : Физматлит, 2005. 648 с.
7. Kim S. K., Lee K. S., Han D. S. A gigahertz-range spin-wave filter composed of width-modulated nanostrip magnonic-crystal waveguides // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. P. 082507.
8. Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 142513.
9. Калиникос Б. А., Устинов А. Б., Баруздин С. А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. М. : Радиотехника, 2013. 216 с.
10. Chumak A. V., Neumann T., Serga A. A., Hillebrands B., Kostylev M. P. A Current-controlled, dynamic magnonic crystal // J. Phys. D : Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 205005.
11. Анненков А. Ю., Герус С. В., Ковалев С. И. Объемные и поверхностно-объемные магнитостатические волны в волноводах, создаваемых ступенчатым полем подмагничивания // ЖТФ. 2004. Т. 74, № 2. С. 98–104.
12. Beginin E. N., Filimonov Yu. A., Pavlov E. S., Vysotskii S. L., Nikitov S. A. Bragg resonances of magnetostatic surface spin waves in a layered structure : Magnonic crystal-dielectric-metal // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 252412.
13. Морозова М. А., Шараевская А. Ю. Дисперсионные характеристики магнитостатических волн в связанных магных кристаллах // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 82–93.
14. Morozova M. A., Grishin S. V., Sadovnikov A. V., Sharaevskii Yu P., Nikitov S. A. Magnonic bandgap control in coupled magnonic crystals // IEEE Trans. on Magnetics. 2014. Vol. 50, № 11. P. 4007204.
15. Ваишковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П. Магнитостатические волны в электронике СВЧ. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1993. 316 с.

## **ЭФФЕКТЫ НЕВЗАИМНОСТИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ГИБРИДНЫХ ВОЛН В ПОПЕРЕЧНО ОГРАНИЧЕННОЙ СЛОИСТОЙ МУЛЬТИФЕРРОИДНОЙ СТРУКТУРЕ**

**А. В. Садовников, К. В. Бубликов, М. А. Константинова,  
Е. Н. Бегинин, С. Е. Шешукова**

Саратовский государственный университет  
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83  
E-mail: SadovnikovAV@gmail.com

В работе рассмотрены эффекты гибридизации поверхностной спиновой и электромагнитной волн в слоистой мультиферроидной структуре феррит-сегнетоэлектрик. С помощью метода конечных элементов проведен расчет дисперсионных характеристик волн, распространяющихся в структуре. Показана трансформация модового состава гибридных спиновых электромагнитных волн в области связи медленной и быстрой электромагнитной волн. Продемонстрировано влияние направления распространения электромагнитной спиновой волны на эффективность гибридизации в волноведущей структуре.

*Ключевые слова:* поверхностная волна, невязимость, слоистая структура, гибридизация.

### **Nonreciprocity of Surface Hybrid Spin-Electromagnetic Waves in Layered Finite-Width Ferrite-Ferroelectric Structure**

**A. V. Sadovnikov, K. V. Bublikov, M. A. Konstantinova, E. N. Beginin, S. E. Shehukova**

In the present work hybridization effects of the spin and electromagnetic waves in a layered structure ferrite-ferroelectric are considered. Using the finite element method the electrodynamic properties of the layered structure are calculated. Shows the transformation of the modes of hybrid electromagnetic waves in the field of communication of slow and fast electromagnetic waves. Shows the influence of the direction of propagation of electromagnetic waves on the spin hybridization efficiency and distribution fields in the waveguide structure.

*Key words:* surface wave, non-reciprocity, layered structure, hybridization.

В связи с развитием новых технологий изготовления тонкопленочных мультиферроидных структур типа феррит-сегнетоэлектрик [1] в настоящее время актуальным является исследование перспективного класса таких планарных волноведущих систем.

Известно, что поверхностные спиновые волны (ПСВ) в ферритовых пленках распространяются преимущественно вдоль одной из поверхностей (максимум полей локализован вблизи одной из сторон пленки) [2]. Это связано с направлением постоянного магнитного поля, перпендикулярного направлению распространения ПСВ. При этом в случае симметричной нагрузки феррита свойства волн, распространяющихся в разных направлениях и с разных сторон, окажутся одинаковыми. Если же нагрузка будет различной либо поверхность феррита окажется деформирована, то условия для распространения ПСВ в разных направлениях оказываются неодинаково-

выми. В этом случае будут проявляться отличия в свойствах дисперсионных характеристик. Данный эффект называется свойством невзаимности [3] и хорошо изучен для направляющих структур с частичным заполнением гиротропной средой [3], для магнетонных кристаллов с периодической деформацией поверхности или периодической металлизацией [4, 5]. Большой интерес к мультиферроикам вызван возможностью двойного внешнего управления, когда электронная перестройка происходит за счет изменения приложенных постоянных электрических и магнитных полей. Активно разрабатываются приборы на основе мультиферроиков, такие как перестраиваемые СВЧ-фильтры, фазовращатели, ответвители мощности [6–8]. Учет свойств невзаимности в слоистых структурах оказывается важным ввиду возможности расширения функциональности указанных СВЧ-устройств. Создание устройств со сложной геометрией и тенденция к уменьшению их размеров требуют рассмотрения волновых процессов с учетом многомодового характера распространения. При этом аналитическое электродинамическое решение задач подобного рода затруднено ввиду того, что для поперечно ограниченных структур с гиротропными средами уравнения Максвелла не распадаются на независимые системы ТЕ- и ТМ-волн [3], и анализ электродинамических характеристик требуется проводить, используя численные методы.

В данной статье при помощи метода конечных элементов (МКЭ) впервые рассматриваются невзаимные свойства гибридных волн, распространяющихся в разных направлениях в слоистой структуре феррит-сегнетоэлектрик, ограниченной в поперечном направлении, а также результаты исследования особенностей гибридизации и свойств невзаимности гибридных волн для быстрых и медленных ветвей дисперсионных характеристик.

В работе [9] на примере планарного ферритового волновода конечной ширины авторами была рассмотрена электродинамическая задача методом конечных элементов для квази ТЕ-волн с отличными от нуля компонентами полей вдоль направления распространения (далее приставку «квази» будем опускать). В исследуемой частотной области свойства этих волн соответствуют ПСВ. Решим похожую задачу для касательно намагниченной ( $H_0 = 1300$  Э) структуры, состоящей из нагруженного сегнетоэлектриком (СЭ) железоиттриевого граната (ЖИГ) на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ). Ширина слоев 2 мм, толщина ЖИГ 20 мкм, СЭ 300 мкм, ГГГ 500 мкм. Граничные условия в виде металлических экранов задавались вдали от ферритовой пленки с целью исключить их влияние на результаты расчета (40 толщин пленки ЖИГ до металлических стенок сверху и снизу от поверхности ЖИГ, 1,5 ширины пленки до магнитных стенок слева и справа расчетной области). Для такой структуры в работе [10] на примере первой поперечной (ширинной) моды с помощью МКЭ был показан хорошо известный эффект гибридизации [11], приводящий к расталкиванию дисперсионных кривых и вызванный взаимодействием ТЕ-волн парциальных систем диэлектрического и ферритового волновода.

Рассмотрим взаимодействие поверхностных ТЕ-волн, распространяющихся в слое ЖИГ со стороны сегнетоэлектрика (будем называть их прямыми и обозначим индексом  $k_+$ ) и со стороны подложки ГГГ (будем называть их встречными и обозначим индексом  $k_-$ ), с волнами – ТЕ, распространяющимися в СЭ-слое. Согласно общепринятой терминологии [3], рассматриваемые поперечные моды волн ферритового слоя будем обозначать  $TE_{\Phi n}$ , а поперечные моды сегнетоэлектрического слоя  $TE_{Cn}$ , где  $n$  – номер моды, соответствующий числу вариаций поля в поперечном направлении структуры. Ветви гибридных волн, групповая скорость которых с уменьшением частоты падает, будем называть  $TE_{C-\Phi n}$ , а ветви с возрастающей групповой скоростью –  $TE_{\Phi-Cn}$  (по асимптотическому поведению с уменьшением частоты).

На примере первой и третьей ширинных мод рассмотрим взаимодействие парциальных систем для значения 4000 диэлектрической проницаемости СЭ-слоя, что соответствует используемым варикондам ВК-4 [12]. Дисперсионные характеристики прямых и встречных волн ферритового и диэлектрического волноводов без взаимодействия представлены на рис. 1, а, б для  $n = 1$  и  $n = 3$  соответственно. В данном случае дисперсии прямых и встречных волн совпадают, т. е. эффектов невзаимности не наблюдается. Результаты расчета слоистой структуры (см. рис. 1, в, г) показывают, что процесс гибридизации привел к расталкиванию дисперсионных кривых первой (см. рис. 1, в) и третьей (см. рис. 1, г) мод. Эффект максимален в области  $f$  и  $k$  вблизи пересечения мод парциальных систем с соответствующими номерами. При этом в слоистой структуре гибридные волны, распространяющиеся в разных направлениях, проявляют невзаимные свойства.

Максимум эффекта невзаимности, который можно трактовать как разницу между  $k_+$ - и  $k_-$ -волн [3]:  $|k_{n+}(f)| - |k_{n-}(f)|$ , соответствует максимальному расталкиванию и соответственно точке пересечения дисперсионных кривых парциальных систем. Стоит также отметить, что частоты отсечек  $k_+$ -волн в слоистой структуре возросли и находятся выше  $f_{\perp}$ , в отличие от волн, распространяющихся со стороны подложки ГГГ. Эти различия волновых процессов стоит соотнести с процессами гибридизации, эффективность которых зависит от перекрытия полей парциальных систем.

Поэтому для встречных волн, максимум компонент полей которых сосредоточен со стороны подложки, область взаимодействия существенно сужается к точке пересечения дисперсионных кривых волн ферритового и диэлектрического волноводов, в отличие от прямых волн, компоненты которых оказываются локализованными внутри СЭ-слоя. Из рис. 1, в, г можно также видеть, что разница между  $k_+$ - и  $k_-$ -волн для первой поперечной моды оказывается больше, чем для третьей, а область взаимодействия парциальных систем с ростом моды смещается по частоте вниз.

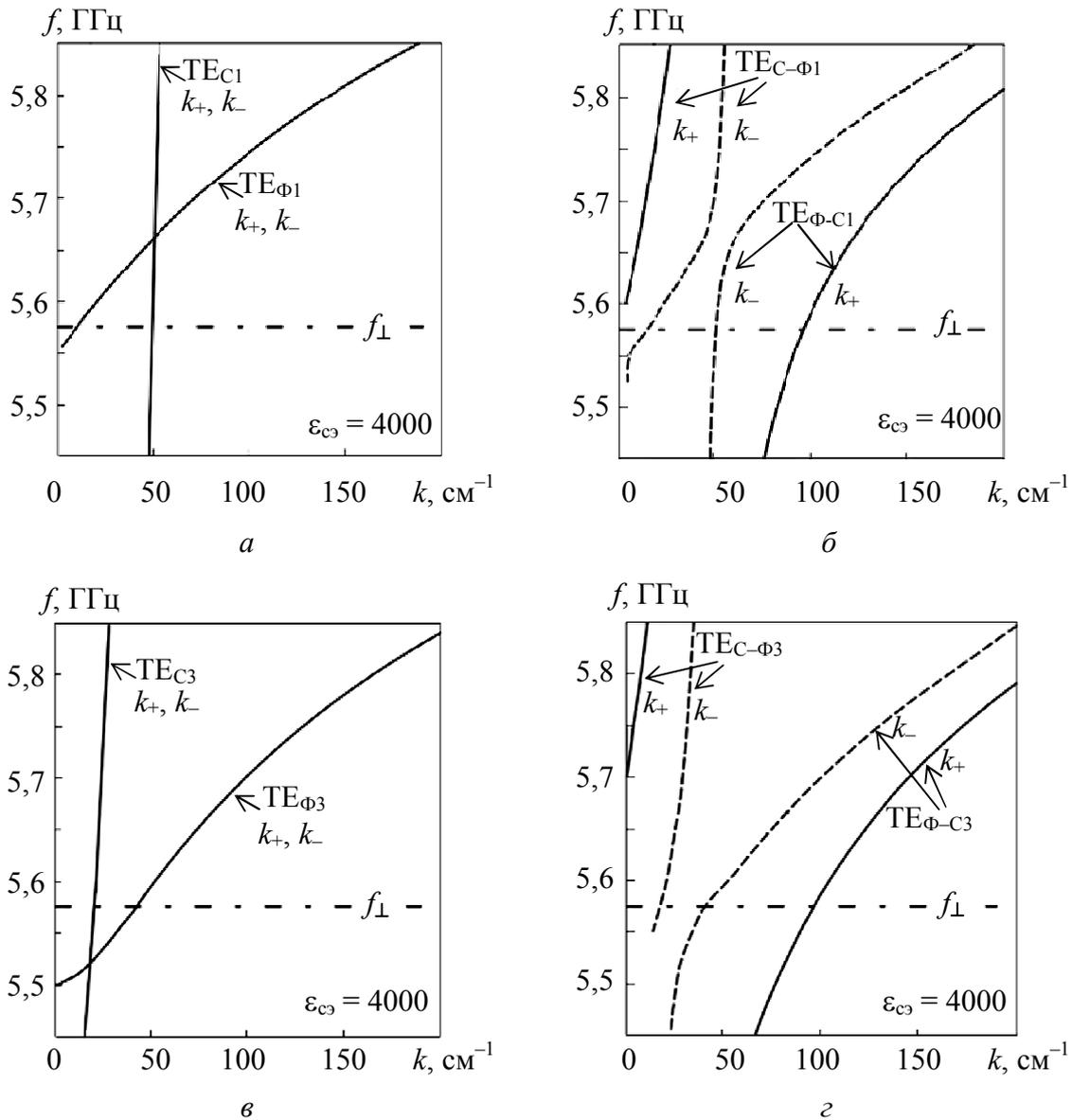


Рис. 1. Результаты расчета дисперсионных характеристик волн парциальных систем без взаимодействия (ферритового и диэлектрического волноводов) для первой (а) и третьей (б) мод, а также волн в слоистой структуры для первой (в) и третьей (г) мод

Электродинамический расчет был выполнен также для первой и третьей поперечных мод для случая, когда диэлектрическая проницаемости СЭ-слоя составляла 8000, что соответствует используемым варикондам ВК-8 [12]. Результаты представлены на рис. 2. Можно видеть, что область связи парциальных систем смещается в область больших частот. При этом расстояние по волновым числам между ветвями дисперсионных кривых  $\text{TE}_{\Phi-C}$  и  $\text{TE}_{C-\Phi}$  при расталкивании выросло как для прямых, так и для встречных волн, что указывает на возросшую эффективность гибридизации. Наблюдается также незначительное увеличение разницы между  $k_+$ - и  $k_-$ -волн, т. е. возрастание невзаимных свойств.

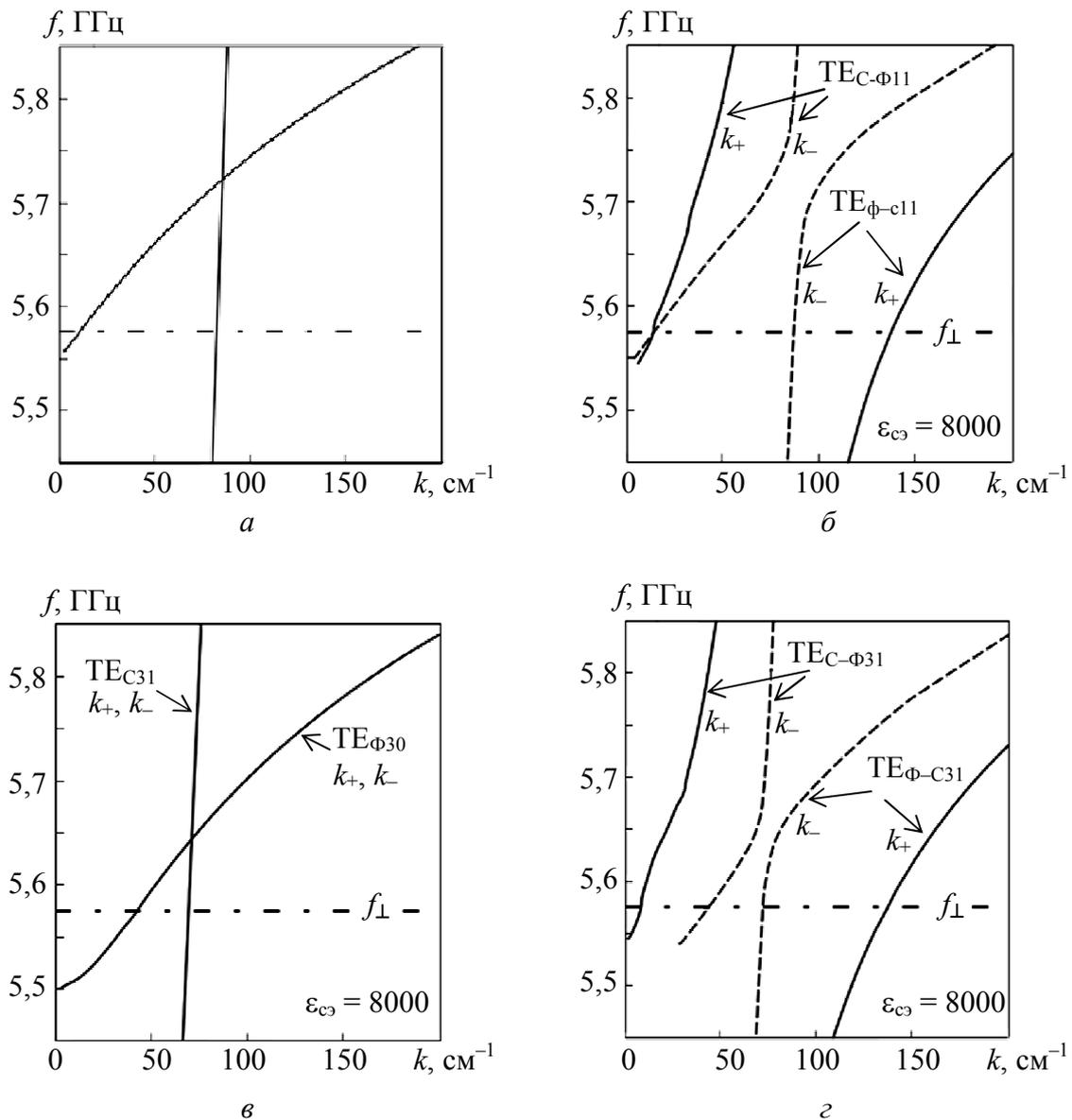


Рис. 2. Результаты расчета дисперсионных характеристик волн парциальных систем без взаимодействия (ферритового и диэлектрического волноводов) для первой (а) и третьей (б) мод, а также волн в слоистой структуре для первой (в) и третьей (г) мод

Таким образом, на основе приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

- невзаимными свойствами слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик можно управлять при помощи изменения параметра диэлектрической проницаемости СЭ-слоя. При этом невзаимность зависит от частоты и номера индекса поперечной моды;
- различие свойств прямых и встречных волн обусловлено локализацией полей с разных сторон ферритовой пленки в силу гиротропии, что приводит к различию в формировании гибридных волн слоистой структуры;
- результаты численных расчетов свойств невзаимности в слоистых мультиферроидных структурах могут найти применение при изготовлении

фильтров, фазовращателей и ответвителей. Большой интерес при этом представляют собой ветви дисперсионных характеристик  $TE_{\phi-C}$ -волн, используемых в приборах СВЧ.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-02-00732, 13-07-12409, 14-02-00976), РНФ (15-19-10040) и стипендий президента РФ (СП-313.2015.5, СП-1551.2013.5).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ozgur U., Alivov Y., Morkoc H.* Microwave ferrites, part 2 : passive components and electrical tuning // J. Mater. Sci. : Mater. Electron. 2009. Vol. 20, № 10. P. 911–952.
2. *Damon R. W., Eshbach J. R.* Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys. Chem. Solids. 1961. Vol. 19. P. 308.
3. *Гуревич А. Г., Мелков Г. А.* Магнитные колебания и волны. М. : Физматлит, 1994. 593 с.
4. *Садовников А. В., Рожнев А. Г., Шешукова С. Е.* Свойства невзаимности поверхностных магнитостатических волн в периодической ферромагнитной структуре со сложным поперечным сечением и несимметричной нагрузкой // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2012. Вып. 13 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 102–107.
5. *Высоцкий С. Л., Бегинин Е. Н., Никитов С. А., Павлов Е. С., Филимонов Ю. А.* Влияние металлизации ферритового магнетонного кристалла на брэгговские резонансы поверхностных магнитостатических волн // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 21. С. 76–81.
6. *Jamali M., Kwon J. H., Seo S. M., Lee K. J., Yang H.* Spin wave nonreciprocity for spin wave logic devices // Scientific Reports. 2013. Vol. 3. P. 3160.
7. *Устинов А. Б., Калиникоз Б. А.* Мультиферроидные периодические структуры на основе магнетонных кристаллов для электронно-перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 13. С. 58–65.
8. *Никитин А. А., Устинов А. Б., Семенов А. А., Калиникоз Б. А.* Планарный тонкопленочный феррит-сегнетоэлектрический СВЧ-фазовращатель // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 7. С. 1–7.
9. *Садовников А. В., Бубликов К. В.* Электродинамические характеристики и моды планарного ферритового волновода конечной ширины // 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. 15–23.
10. *Садовников А. В., Бубликов К. В., Бегинин Е. Н., Никитов С. А.* Электродинамические характеристики слоистой структуры металл–диэлектрик–сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл конечной ширины // Радиотехника и электроника. 2014. № 59. С. 876–881.
11. *Демидов В. Е., Калиникоз Б. А.* Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл–сегнетоэлектрик–ферромагнетик–сегнетоэлектрик–металл // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 7. С. 8–17.
12. *Вербицкая Т. Н.* Вариконды. М. ; Л. : Гос. энерг. изд-во. 1958. 65 с.

## О КОНСТРУКТИВНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И МОДЕЛИРОВАНИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВТОЭМИССИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

**В. М. Аникин**

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

Рассмотрены подходы к моделированию случайных диффузионных процессов в автоэмиссионной электронике.

*Ключевые слова:* диффузионные процессы, электронная эмиссия, марковские модели.

### **On the Constructive Definition of Random Values and Modeling of Diffusion Processes**

**V. M. Anikin**

Some approaches to modeling of random diffusion processes for cold emission electronics are observed.

*Key words:* diffusion processes, electron emission, Markov models.

При компьютерном моделировании случайных процессов базовой задачей является построение алгоритмов генерации «случайности», наделенной «необходимыми» (в рамках строящегося модельного приближения) вероятностными свойствами. Каким бы ни был случайный процесс, его исчерпывающее описание может быть представлено двояко: либо в терминах *случайных же процессов* с полностью определенными вероятностными характеристиками или уравнений относительно соответствующих случайных функций, либо в терминах *детерминированных функций*, являющихся многомерными плотностями распределения, или уравнений относительно этих плотностей.

Представление случайного процесса через некоторый случайный процесс стандартного типа называют *прямым описанием* случайного процесса. Примерами таких «стандартных» процессов могут служить *белый шум*, являющий собой искусственную математическую абстракцию, и *винеровский процесс*, математическая «добропорядочность» которого характеризуется рядом корректно описываемых свойств. Когда связь между изучаемым случайным процессом и эталонным случайным процессом может быть представлена в виде функциональной зависимости, можно говорить о *явном прямом описании* процесса. Когда же подобная связь «зашифрована» в соответствующем *стохастическом уравнении*, включающем изучаемую и эталонную случайные функции, данное описание будем именовать *неявным прямым описанием*. Представление случайных процессов через хорошо изученные «эталонные» процессы иногда называют *конструктивным описанием* случайных процессов [1].

Нахождение многомерных вероятностных распределений как исчерпывающих характеристик изучаемого случайного процесса, в отличие от случая прямого (явного или неявного) задания изучаемого процесса через эталонный процесс, называют *косвенным описанием* случайного процесса. Очевидно, что и в данном виде косвенного описания можно выделить два подвида: *явное и неявное*. *Явное* описание означает наличие явного выражения для многомерной плотности вероятности, а *неявное* – формулировку соответствующих уравнений относительно данной характеристики, которую предстоит найти в процессе решения. При неявном описании со *случайным* процессом соотносится *детерминированное* уравнение относительно плотностей вероятности.

В практике моделирования случайных процессов в различных областях знания особое место принадлежит броуновскому движению, или винеровскому процессу. Под стандартным винеровским процессом понимается непрерывный гауссовский нестационарный процесс, обладающий независимыми нормально распределенными приращениями на неперекрывающихся интервалах времени. Винеровский процесс обладает свойствами марковского процесса, мартингала и автомодельного процесса [1].

Первая математическая теория броуновского движения принадлежит французскому математику Л. Башелье (1900 г.), изучавшему уровень цен акций и других финансовых индексов на парижской бирже ценных бумаг. Броуновское движение у Л. Башелье возникает как формальный предел простейших случайных блужданий. *Винеровским* этот процесс называется в честь Н. Винера, давшего в 1923 г. строгое его математическое описание [1].

Спустя пять лет после работы Л. Башелье, в 1905 г., появилась статья А. Эйнштейна [2], в которой он представил первую физико-математическую модель броуновского движения в форме его *неявного косвенного описания*. Работы А. Эйнштейна [2–4], включая его 20-страничную диссертацию [3] (ее история подробно прослежена в [5–7]), как, собственно, по броуновскому движению, так и в целом по объемным реологическим свойствам взвеси частиц имели в те годы фундаментальную и прикладную направленность. Давая описание различных способов определения числа Авогадро  $N$ , в том числе из полученного им уравнения для среднего квадрата смещения броуновской частицы – первого в физической теории флуктуационно-диссипативного уравнения, связывающего средний квадрат флуктуаций с параметром вязкости, Эйнштейн внес существенный вклад в решение проблемы, касавшейся подтверждения реальности существования атомов (молекул). Сейчас уже трудно представить, но дискуссия по этому вопросу окончательно была прекращена лишь в результате научных достижений первого десятилетия прошлого века. Как отмечал А. Пайс, биограф А. Эйнштейна, «вопрос был решен раз и навсегда ввиду небывало близкого совпадения значений  $N$ , полученных самыми разными методами <...> в результате изучения таких разных явлений, как радиоактивность, броуновское движение, голубой цвет неба» [8, с. 97]. Эйнштейн, кроме того, отмечал, что познание сущности броуновского движения привело к «внезапно-

му исчезновению» всяких сомнений в достоверности больцмановского понимания термодинамических законов.

Броуновское движение и его обобщения, процессы, построенные на основе броуновского движения, сегодня широко используются в построении многих моделей со «сложной» структурой в естественных науках и финансовой математике [1]. Классическим алгоритмом моделирования броуновского движения является метод на основе суммирования гауссовских случайных величин [9, 10]. Исходя из начального положения, последующие ее положения (с некоторым временным шагом) определяются как постепенное увеличение суммы нормально распределенных случайных чисел. Широко используется и метод *срединного смещения* [9–11], в котором собственно броуновское движение представляется траекторией, проходящей через *заданную* точку. Броуновское движение моделируется на приведенном временном интервале  $(0, 1)$ . Фиксируется начальное положение  $X(0) = 0$ , и априорно в качестве  $X(1)$  принимается некоторое значение гауссовского случайного числа, которое участвует в последующем процессе моделирования согласно определенному алгоритму. Однако этот метод, если подходить строго, не отвечает определению стандартного броуновского движения, которое не требует априорного задания процесса сразу в двух точках, в том числе и упреждающего значения  $X(1)$ . Строго говоря, данная ситуация отвечает так называемому *броуновскому мосту*, но не стандартному процессу.

В [12, 13] построены альтернативные итерационные алгоритмы моделирования диффузионных процессов, основанных на броуновском движении, в форме линейных авторегрессионных уравнений первого порядка. В качестве входного возмущения рассматривается дискретный нормированный (с нулевым средним и единичной дисперсией) белый гауссовский шум. Эти уравнения допускают переход к соответствующим стохастическим дифференциальным уравнениям, содержащим стохастические дифференциалы от винеровского процесса. В [13] сформулировано, в частности, каузальное авторегрессионное уравнение для броуновского моста (процесс, как говорилось, отличается от винеровского процесса закреплением значений в граничных точках). Данное изменение начальных условий существенно меняет итерационный алгоритм.

Моделирующие уравнения [13] связывают два важных случайных процесса – белый шум и броуновское движение, имеют непрерывные аналоги и могут легко обобщаться на двумерные и трехмерные процессы посредством введения угловых координат, имеющих равномерное распределение [9]. Сначала моделируется направление смещения, а затем, на основании итеративной процедуры, величина смещения в данном направлении.

Диффузионные процессы играют фундаментальную роль для функционирования как термоэлектронных, так и полевых эмиттеров. Для первого типа характерна диффузия атомов бария в материале эмиттера (оксидный катод, импрегнированный катод), для второго – диффузия адатомов на эмитирующей поверхности. Для автоэмиттеров на основе микро- и на-

ноострийных структур, в частности углеродных нанотрубок, физическими реалиями являются статистическая особенность эмиссионных рельефов, а также разнообразные физико-химические эффекты на поверхности и вблизи нее, включая адсорбцию и десорбцию атомов вблизи центра эмиссии, дрейф атомов по поверхности, диффузию атомов из материала катода, ионизацию атомов остаточных газов вблизи эмиссионной структуры, ионную бомбардировку и т. д.

Названные процессы приводят к стохастизации величины потенциального барьера, работы выхода электронов, напряженности электрического поля вблизи эмиттирующих центров (в том числе за счет случайного изменения их геометрии и разрушения), что, как следствие, ведет к флуктуациям и неустойчивостям автоэмиссионного тока, в том числе к известному эффекту бистабильных флуктуаций тока с отдельного центра эмиссии и «мерцанию» ансамбля эмиттеров – случайному изменению числа действующих эмиссионных центров с течением времени, а также к разрушению автоэмиттерных систем.

Если интересоваться не столько процессами диффузии на поверхности эмиттеров, сколько ее последствиями, то учет диффузионных и иных механизмов, приводящих к флуктуациям тока полевых катодов, можно решать в рамках марковских моделей на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей эмиссионных состояний катода, с которыми, как правило, соотносится число функционирующих центров эмиссии в данный момент времени или иные количественные характеристики эмиссии (например, объем эмитированного заряда) [12].

В качестве базовой марковской модели при таком подходе используется модель процесса «рождения и гибели» (в случайные моменты времени) центров электронной эмиссии, описываемая системой уравнений относительно вероятностей состояния  $P_n(t)$ , где  $n$  – число «горячих» центров эмиссии в момент  $t$ . Эта модель может анализироваться в различных приближениях, касающихся:

а) предположений о степени доминантности той или иной составляющей («рождение» или «гибель») случайного процесса (чистый процесс рождения, чистый процесс гибели, смешанный процесс рождения и гибели), которые определяют соответствующий режим функционирования катодной системы – переходной процесс при подаче импульса напряжения (инерционное вовлечение в работу ансамбля центров эмиссии), активную деградацию катода, динамический (и в общем случае нестационарный) процесс работы эмиттера, отражающий неустойчивость эмиссии с отдельного центра и мультистабильный характер эмиссии с ансамбля источников электронов;

б) предположений об условии завершения процесса эмиссии (наличие поглощающего состояния, явный учет конечности процесса – прерванный процесс рождения), что отвечает физической картине полного разрушения катода, в частности, в связи с исчерпанием его эмиссионного ресурса;

в) предположений относительно характера интенсивностей перехода из одного состояния в другое (линейная или нелинейная зависимость интенсивности от числа состояний), что на физическом уровне можно трактовать как «кооперативное» и «некооперативное» функционирование центров электронной эмиссии.

Привлекательная особенность марковских моделей состоит в возможности получения аналитических решений – вероятностей эмиссионных состояний катода, средних значений и дисперсии (в нестационарном режиме и в асимптотическом приближении) числа эмиссионных центров и тока, корреляционных функций и частотных и частотно-временных спектров флуктуаций числа центров эмиссии и даваемого ими тока для различных модификаций марковских процессов и процессов восстановления. Общим свойством рассмотренных разновидностей моделей случайных нестабильностей тока автоэмиссии является проявление «генетического», видимо, свойства всех марковских моделей – давать в спектре флуктуаций частотные зависимости типа лоренциана. В случае примерного равенства интенсивностей рождения и гибели центров эмиссии, когда процесс становится стационарным, эти соотношения «схватывают» одну любопытную, реально наблюдающуюся ситуацию, которая отвечает участку вольт-амперной характеристики катода в зоне отклонения процесса от поведения, предсказываемого теорией Фаулера–Нордгейма. Поскольку лоренциан – типичная спектральная зависимость, наблюдаемая в бистабильных системах различного рода, описываемых стохастическим уравнением, напрашивается мысль о формулировке такого уравнения и для процесса бистабильных флуктуаций полевой эмиссии. Бистабильная система способна совершать мгновенные переходы между двумя состояниями, что по терминологии теории катастроф представляет собой так называемую катастрофу типа сборки.

Различные модификации марковских моделей электронной эмиссии рассмотрены в [14–31]. Моделирование конкретных флуктуационных и деградиационных явлений в полевой и термоэлектронной эмиссии основано на корректном соотношении модельных предположений с размеченным с графом состояний соответствующей дискретной марковской модели (системы уравнений Колмогорова), включая определение общей длительности процесса и характера смены эмиссионных состояний, связанного с заданием интенсивностей переходов, а также предположение о наличии особых эмиссионных состояний. Вероятности состояний эмиссионной системы определяют вид ее флуктуационных и надежностных характеристик в рамках каждой конкретной модели (бистабильные флуктуации, флуктуации тока с массива эмиттеров, деградиационные явления и т. п.). Функция надежности работы эмиттера также выражается через решения модельных уравнений. Как правило, получаемые модели являются нестационарными (в частности, модификация модели Шоттки для дробового шума, получаемая при априорном предположении конечности эмиссионного ресурса катода). Стациона-

нарная модель возникает в предположении равенства интенсивностей процессов рождения и гибели эмиссионных центров, отражая экспериментально наблюдаемую ситуацию. Модельные представления, в том числе описанные выше, соотносятся с экспериментальными исследованиями и учитываются при конструировании эмиттирующих структур [32]. Ценность математической модели определяется также общими критериями научности [33].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шуряев А. Н.* Основы стохастической финансовой математики : в 2 т. М. : Фазис, 1998. Т. 1. 512 с. ; Т. 2. 544 с.
2. *Einstein A.* On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular-kinetic theory of heat // *Ann. Phys. (Leipzig)*. 1905. Bd. 17. S. 549–560.
3. *Einstein A.* Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. Inaugural dissertation. Zürich Universität. Bern : Buchdruckerei K. J. Wyss, 1905. 21 s. URL : <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:30378/eth-30378-01.pdf> (дата обращения : 12.04.2015).
4. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов : в 4 т. М. : Наука, 1966. Т. 3 : Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики. 1901–1955. С. 75–91.
5. *Аникин В. М., Усанов Д. А.* Диссертация в зеркале автореферата : метод. пособие для асп. и соиск. ест.-науч. спец. М. : Изд-во ИНФРА-М, 2013. 128 с.
6. *Аникин В. М.* Альберт Эйнштейн и Питирим Сорокин : истории диссертационных защит // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2011. Т. 19, № 3. С. 52–76.
7. *Аникин В. М.* Сравнение европейской и российской систем присуждения ученой степени (на примере защит диссертаций Альбертом Эйнштейном и Питиримом Сорокиным) // *Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та*, 2011. Вып. 9 : Магнитоэлектроника. Микро- и наноструктуры. Прикладные аспекты. Проблемы физического образования. С. 125–144.
8. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М. : Наука, 1989. 568 с.
9. *Peitgen H. O., Jürgens H., Saupe D.* Chaos and fractals : new frontiers of science. 2<sup>nd</sup> Edition. N. Y. : Springer Verlag, Inc., 2004. 864 p.
10. *Кроновер Р. М.* Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М. : Постмаркет, 2000. 352 с.
11. *Fournier D., Fussel D., Carpenter L.* Computer rendering of stochastic models // *Comm. of the ACM*. 1982. Vol. 25, № 6. P. 372–384.
12. *Аникин В. М.* Марковские аналитические модели стохастических и хаотических процессов и структур : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Саратов, 2005. 690 с.
13. *Anikin V. M., Barulina Yu. A., Goloubentsev A. F.* Regression equations modeling diffusion processes // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 215, iss. 1–4. P. 185–190.
14. *Anikin V. M., Goloubentsev A. F.* Statistical models of fluctuation phenomena in field emission // *Solid State Electronics*. 2001. Vol. 45, iss. 6. P. 865–869.
15. *Аникин В. М., Голубенцев А. Ф.* Статистические модели эмиссионных флуктуаций и надежности автоэмиттерных систем // *Радиотехника*. 2003. № 2. С. 55–60.
16. *Аникин В. М.* Статистическое описание автоэмиссионных рельефов // *Радиотехника*. 2005. № 4. С. 26–30.

17. Голубенцев А. Ф., Аникин В. М., Клименко В. Г. Статистические модели квази-регулярных радиофизических и оптических структур. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1991. 116 с.
18. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Theoretical estimation of low-frequency noise of a semiconductor field emitter // Radiophysics and Quantum Electronics. 1993. Vol. 36, iss. 9. P. 658–660.
19. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Markov models of emission distortions for matrix cathodes // Revue «Le Vide, les Couches Minces». Paris, 1994. Suppl. 271. P. 147–150.
20. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Theoretical modeling inhomogeneous field emission area // The 9<sup>th</sup> Intern. Vacuum Microelectronics Conf. IVMC'96 : Technical Digest. St.-Petersburg, Russia, 1996. July. P. 102–106.
21. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Statistical Model of bistable fluctuations in field emission // The 10<sup>th</sup> Intern. Vacuum Microelectronics Conf. IVMC'97 : Technical Digest. Kyongju, Korea, 1997. Aug. 17–21. P. 362–366.
22. Goloubentsev A. F., Anikin V. M., Sinitsyn N. I. Potential of Markov emission models in estimation of fluctuations properties of FEA // The 2<sup>nd</sup> Intern. Vacuum Electron Sources Conf. IVESC'98 : Extended Abstracts. Tsukube, Jupan, 1998. July 7–10. P. 201–203.
23. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Theoretical estimations of FEA's reliability // The 11<sup>th</sup> Intern. Vacuum Microelectronics Conf. IVMC'98 : Proceedings. Asheville, North Carolina, USA, 1998. July 19–24. P. 21–22.
24. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. On the spectrum of fluctuations in the field emission // Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies : Proceedings of the Intern. University Conf. UHF'99 (St. Petersburg, Russia, 1999. May 24–28) / ed. by G.G. Sominski. St.-Petersburg, Russia, 1999. P. 304–306.
25. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Models of instabilities in field emission // Material Research Society Spring Meeting'99. Symposium C : Material Issues in Vacuum Microelectronics II : Book of Abstracts. San Francisco, California, USA, 1999. April 5–9. P. 28.
26. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Chaotic models of fluctuations in field emission // 2000 IEEE Intern. Vacuum Electron Sources Conf. : Technical Digest. Orlando, Florida, USA, 2000. July 10–13. P. 22.
27. Goloubentsev A. F., Anikin V. M. Statistical model of cathodes with limited emissive resource // The 8<sup>th</sup> Intern. Vacuum Microelectronics Conf. IVMC'95 : Technical Digest. Portland, Oregon, USA : EDS-IEEE, 1995. July 30–August 3. P. 238–241.
28. Anikin V. M. On statistical description of nonstationary emission processes // 2006 IEEE Intern. Vacuum Electronics Conf. held jointly with 2006 IEEE Intern. Vacuum Electron Sources : Proceedings. Monterey, California, USA, 2006. April 25–27. P. 173–174.
29. Аникин В. М. Статистические характеристики нестационарного эмиссионного процесса // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14, № 3. С. 70–84.
30. Аникин В. М. Две задачи теории случайных и хаотических процессов (К 80-летию со дня рождения профессора А. Ф. Голубенцева) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 72–77.
31. Аникин В. М., Муштаков А. В. Характеристики надежности катода в Марковских моделях эмиссионных процессов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 37–50.
32. Татаренко Н. И., Кравченко В. Ф. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 192 с.
33. 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.

## СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДУЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФОРМАТОВ ДАННЫХ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

**А. В. Ляшенко, В. А. Малярчук\***

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 предлагаются способы построения высокопроизводительной аппаратуры для обеспечения представлений структурных элементов данных в ЭВМ в процессе их хранения и оперативной обработки. Исследуются устройства с параллельным вводом данных, осуществляющие преобразование за один такт внешнего генератора тактовых импульсов.

*Ключевые слова:* формат данных, защита информации, микропроцессор.

### **Data Format Transformation Modules for Computer Facilities**

**A. V. Lyashenko, V. N. Malyarchuk**

The methods for design high-performance data format transformation modules are considered. The devices with parallel data input which are carrying out transformation for one step of the external generator of clock impulses are investigated.

*Key words:* format of data, information security, microprocessor.

Особую роль в микропроцессорах играют преобразователи форматов представления данных машинного слова [1, 2]. Задача преобразования формата представления данных исходного упорядоченного бинарного множества часто возникает в системах управления базами данных, защиты информации и др. [3, 4]. С точки зрения вычислительной сложности эта задача достаточно трудоемкая. В связи с этим ряд работ авторов посвящен разработке аппаратных формирователей перестановок (*FP*), обзор которых можно найти в [5, 6]. В классификации *FP* различают генераторы перестановок и функциональные *FP*. В последних перестановках из  $N$  элементов это однозначно определяется натуральным числом  $FD_j$  (где  $1 \leq j \leq N!$ ), которое в дальнейшем будем называть дескриптором формата. На практике для ускорения преобразования и упрощения *FP* дескриптор формата  $FD_j$  может иметь более сложную структуру. При этом мощность полного множества различных дескрипторов формата перестановки длиной  $N$  определяется  $|\{FD\}_N| = N!$ . Работа функциональных *FP* основана на возможности факторизации представления чисел [7]. Функциональные *FP* строятся с использованием транспозиционных, сдвиговых и комбинированных алгоритмов,

при этом преобразования выполняются за несколько раундов, а аппаратная сложность, исчисляемая в эквивалентных логических вентилях, растет приблизительно как  $N^2$ .

При разработке *FP*, предназначенных для преобразования форматов данных, необходимо учитывать, какой будет использоваться интерфейс передачи исходных данных, – последовательный или параллельный [8, 9]. В случае последовательной передачи данных временем преобразования исходного вектора данных длиной  $N$  будет время  $\tau_p = N\tau$ , где  $\tau$  – период следования тактовых импульсов внешнего генератора. В этом случае *FP* не будет задерживать поток данных, поступающих по последовательному каналу. В случае параллельной передачи данных наилучшим временем преобразования исходного вектора данных длиной  $N$  будет время  $\tau_p = \tau$ , и интерес представляют одноктактные *FP*.

Для аппаратных *FP* перспективным является метод разбиений исходного упорядоченного множества данных  $A = (a_1, a_2, \dots, a_N)$  на подмножества, которые упорядочены между собой [10, 11]. Одним из наиболее эффективно реализуемых аппаратно является метод последовательного разбиения исходного множества на два равномоощных подмножества  $A_1$  и  $A_2$  [12, 13]:

$$A_1 \cup A_2 = A \ \& \ A_1 \cap A_2 = \emptyset \ \& \ |A_1| = |A_2|.$$

Орграф, иллюстрирующий данный метод, представляет собой двоичное дерево. В каждом узле орграфа соответствующее подмножество исходного множества разбивается на два подмножества, из которых одно позиционируется перед другим. В результате выполнения преобразований на  $K = \log_2(N)$  уровнях узлов орграфа образуется перестановка исходного упорядоченного множества.

Осуществляя различные разбиения в узлах орграфа, можно получить любую перестановку  $P$  исходного множества. Действительно, число способов разбиений множества мощностью  $N$  на два подмножества мощностью

$$\frac{N}{2} \text{ — } R_N = \frac{N!}{(N/2)!}.$$

Таким образом, число различных разбиений подмножеств в узлах орграфа составляет

$$\begin{aligned} \tilde{R}_N &= \frac{N!}{((N/2)!)^2} \cdot \left( \frac{(N/2)!}{((N/4)!)^2} \right)^2 \cdot \left( \frac{(N/4)!}{((N/8)!)^2} \right)^4 \cdot \dots \cdot \left( \frac{(N/(N/2))!}{((N/N)!)^2} \right)^{N/2} = \\ &= N! \cdot \prod_{i=1}^{\log_2 N} \left( \frac{(N/2^{i-1})!}{((N/2^i)!)^2} \right)^{2^{i-1}} = N!. \end{aligned}$$

Так как преобразования выполняются в различных узлах орграфа, процесс преобразования распараллеливается. Пользуясь данной методикой, можно разрабатывать универсальные и инволютивные преобразователи форматов данных [14, 15].

Функциональный *FP*, основанный на таком методе, предложен в [8]. Устройство формирует перестановку, определяемую дескриптором, состоящим из  $N$  уникальных бинарных строк длиной  $\log_2(N)$ , и одновременно преобразует последовательный код исходных данных в параллельный. Однако из-за суммирования временных задержек на уровнях узлов дешифрации данный *FP* нельзя использовать для обеспечения обработки больших блоков данных со скоростью передачи более 1 Гбит/с [16]. Повышение производительности *FP* возможно за счет конвейерной обработки исходных данных. Схема *FP* для двух уровней узлов дешифрации, позволяющая выполнять перестановку вектора данных из четырех элементов, приведена на рис. 1.

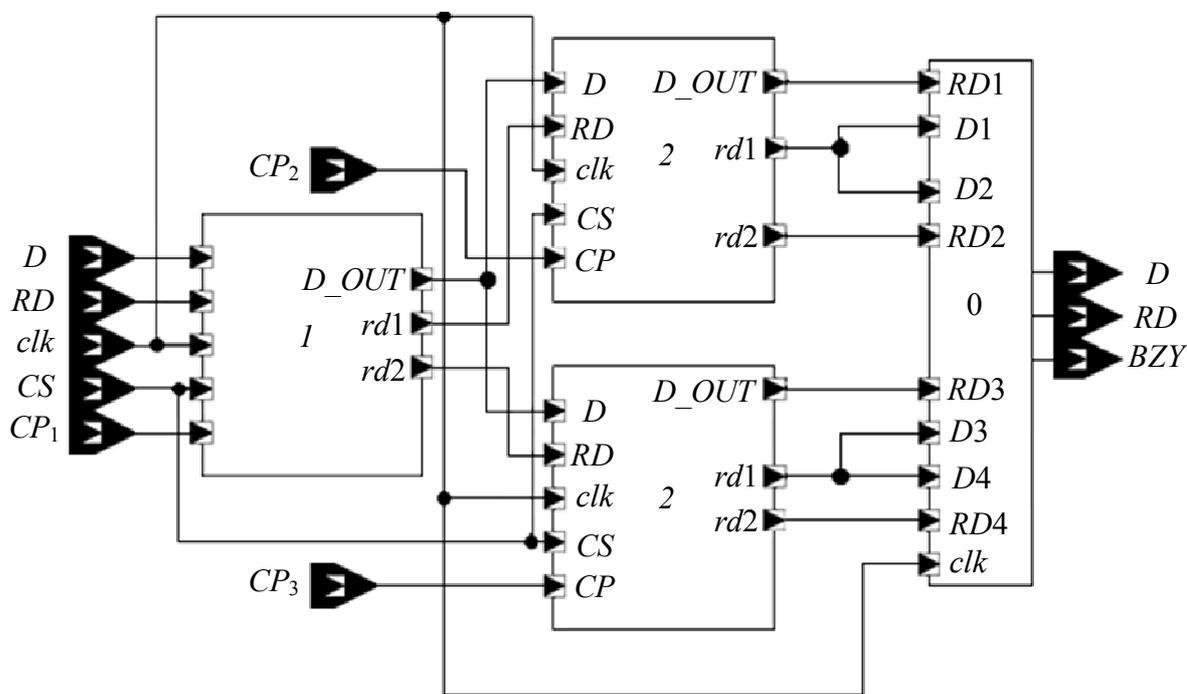


Рис. 1. Схема *FP* для двух уровней узлов дешифрации

Моделирование *FP* для двух уровней узлов дешифрации проводилось с использованием языка *SystemC* и пакета программ *Synopsys System Studio* [17, 18]. При этом использовалась методика, описанная в [19].

Перед началом преобразования в циклические сдвиговые регистры хранения кодов дешифрации заносятся управляющие коды дешифрации. Для этого управляющая ЭВМ устанавливает вход *RD* в состояние с низким логическим уровнем, подает на входы *CP* управляющие коды и записывает их в регистры по очередному импульсу *clk*, устанавливая для этого на входе *CS* состояние с высоким логическим уровнем. Для перестановки очеред-

ного вектора данных  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$  вход  $CS$  устанавливается в состояние с низким логическим уровнем. На вход данных  $D$  элемента первого уровня дешифрации подается элемент  $a_1$  вектора данных. Вход  $RD$  устанавливается в состояние с высоким логическим уровнем и по очередному импульсу  $clk$   $a_1$  записывается в элемент первого уровня дешифрации. По заднему фронту импульса  $clk$  в состоянии  $RD = 1, CS = 0$  логическая схема этого элемента формирует сигналы на выходах разрешения записи  $rd_1 = s, rd_2 = \bar{s}$ , где  $S$  – первый бит регистра кодов элемента первого уровня. После чего осуществляется циклический сдвиг битов управляющего кода регистра первого уровня, и управляющий бит  $S$  заменяется на следующий.

По фронту следующего импульса  $clk$  данные из логического элемента первого уровня  $a_1$  переписываются в первый элемент второго уровня при  $rd_1 = 1, rd_2 = 0$  или во второй элемент второго уровня при  $rd_1 = 0, rd_2 = 1$ , затем в элемент первого уровня записывается значение  $a_2$  вектора данных. Работа всех логических элементов узлов дешифратора осуществляется по одинаковому алгоритму. После загрузки текущего вектора данных в дешифратор без остановки загружается следующий. В результате через  $N = 4$  тактовых импульсов  $clk$  элементы  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$  записываются в двойной буферный регистр накопления и хранения форматированных данных в порядке, определяемом кодами дешифрации. При сигнале двойного буферного регистра  $RD = 0$  перестановка вектора  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$  в параллельном коде записывается во второй регистр и сигнал  $RD$  двойного буферного регистра накопления и хранения форматированных данных принимает высокий логический уровень. Если сигнал двойного буферного регистра  $RD = 1$ , формируется выходной сигнал  $BZY = 1$ , и процесс преобразования приостанавливается путем прекращения подачи тактовых импульсов  $clk$  до момента освобождения второго регистра.

В общем случае  $FP$  с конвейерной обработкой состоит из  $K$  уровней узлов дешифрации, выполняющих функцию перестановки данных  $(a_1, \dots, a_n)$  [20, 21]. Логические элементы узлов дешифратора имеют одинаковую структуру.

Управление перестановкой осуществляется кодами, загружаемыми в циклические сдвиговые регистры логических элементов узлов дешифратора. Причем в логический элемент первого уровня  $1$  загружается  $N$  битов управляющих кодов, в логические элементы второго уровня  $2 - N/2$ , а в логические элементы  $K$ -го уровня  $-\frac{N}{2^k}$ .

Таким образом, за счет конвейерной обработки данных в узлах дешифрации удастся сократить время выполнения перестановки примерно в  $K$  раз, так как общее время задержки определяется временем задержки на одном уровне узлов  $FP$ . Кроме того, число логических элементов узлов дешифрации составляет  $N - 1$  и растет линейно с ростом  $N$ , что позволяет реализовать  $FP$  для перестановки больших блоков данных.

Наибольшим быстродействием обладают функциональные  $FP$ , осуществляющие перестановку за один такт внешнего генератора тактовых

импульсов. Задержка на преобразование определяется задержкой двух последовательно соединенных вентилях. Использование принципа двойной буферизации позволяет максимально увеличить производительность однотактных функциональных *FP* (*OFFP*).

Процесс преобразования в *OFFP* можно разделить на две фазы: дешифрация и сборка. Модель *OFFP* иллюстрируется диаграммой, представленной на рис. 2, где осуществляется перестановка упорядоченного множества из 14 элементов.

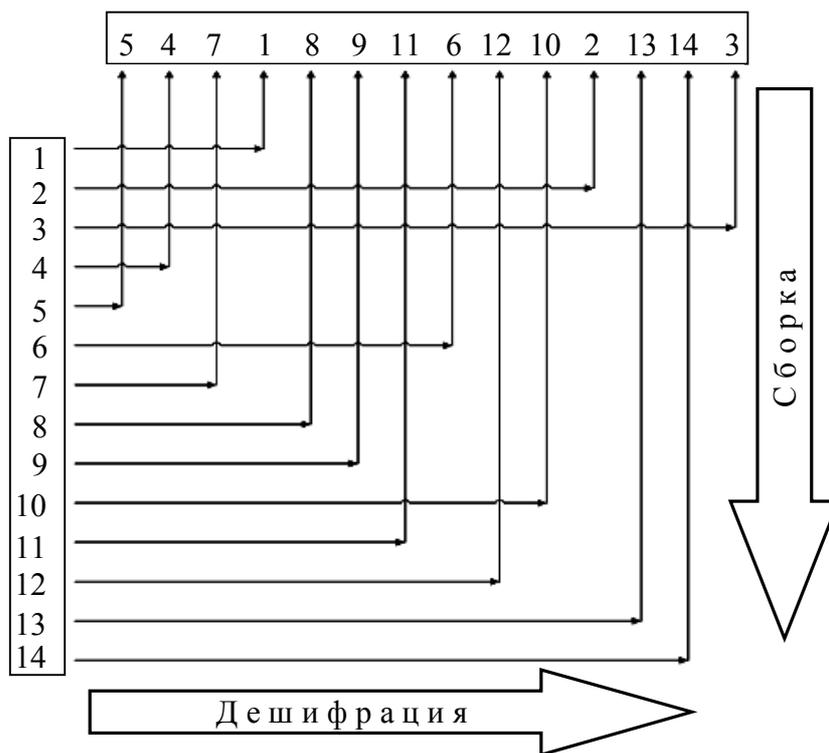


Рис. 2. Диаграмма орграфа, иллюстрирующего работу *OFFP*

Аппаратная сложность *OFFP*, исчисляемая в эквивалентных логических вентилях, растет как  $N^2$ , однако, в отличие от функциональных *FP*, основанных на факторизации чисел, *OFFP* осуществляет перестановку не за  $N$ , а за один такт генератора тактовых импульсов.

Блок-схема *OFFP* приведена на рис. 3, а на рис. 4 – логические схемы блоков 3–9. *OFFP* состоит из регистров исходной строки первой и второй групп (1, 2) дешифраторов битовой транспозиции первой и второй групп (3, 4), регистра кодов битовой транспозиции 5, блоков сборки битовой транспозиции второй и первой групп (6, 7), регистров результирующей строки второй и первой групп (8, 9). Управление *OFFP* осуществляется сигналами установки регистра исходной строки первой и второй групп РИС1, РИС2, сигналами разрешения установки регистра результирующей строки первой и второй групп РРС1, РРС2. На вход *clk* подаются тактовые импульсы от внешнего генератора тактовых импульсов.

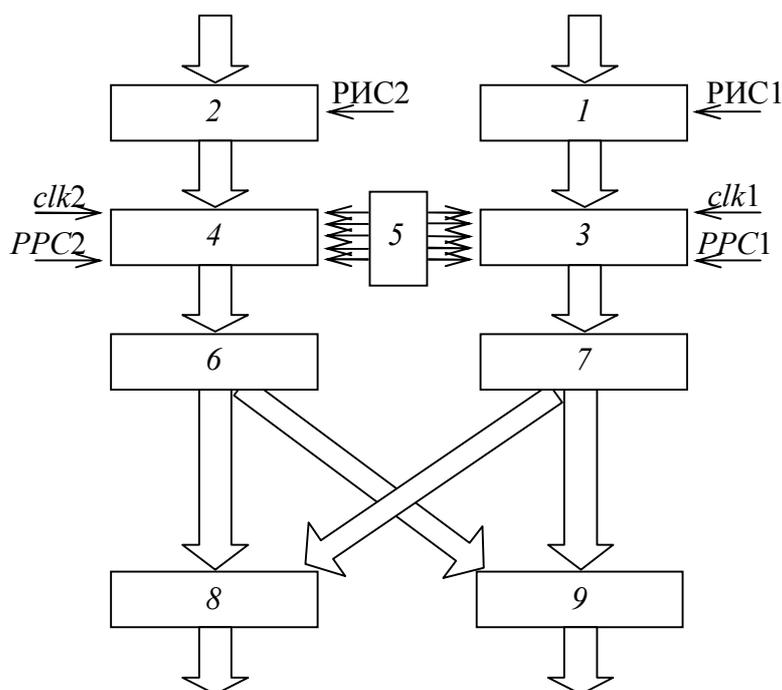


Рис. 3. Блок-схема OFFP с двойной буферизацией

По сигналу RISC1 исходный вектор данных  $(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$  длиной  $N$  бит с внешней шины данных записывается в регистр 1. Независимо, по сигналу RISC2, с внешней шины данных в регистр 2 может быть записан следующий вектор данных. На один вход логических элементов 2И-НЕ, входящих в дешифратор битовой транспозиции 3, подается соответствующий бит вектора исходных данных (БИС1, ..., БИС $N$ ) от регистра 1 (см. рис. 4). На второй вход этих логических элементов подается сигнал от регистров кодов 5. В результате на выходе элемента И-НЕ с  $N$ -входами появляется сигнал БИС с порядковым номером, соответствующим высокому логическому уровню сигнала соответствующего регистра кодов 5. Если сигнал PPC1 имеет высокий логический уровень, то по сигналу  $clk$  инвертированная перестановка исходного вектора данных записывается в регистр 9. Сигнал PPC1 имеет высокий логический уровень в том случае, если предыдущая перестановка вектора исходных данных считана из регистра 9, и он готов к приему новой перестановки. Если сигнал PPC1 имеет низкий логический уровень, а регистр 8 готов к приему новой перестановки исходных данных, то сигнал PPC2 имеет высокий логический уровень и данные попадают в регистр 8. Если оба регистра результирующей строки оказываются заняты (PPC1 и PPC2 имеют низкий логический уровень), возникают пропуск тактовых импульсов  $clk$  и задержка потока формируемых данных. Работа второй группы блоков 2, 4, 6, 8 аналогична работе первой группы блоков 1, 3, 7, 9.

Таким образом, перестановка выполняется за один такт внешнего генератора тактовых импульсов. Это дает возможность осуществить высокоскоростной обмен данными между внешними устройствами с одновременным выполнением управляемой кодом перестановки битов исходных век-

торов данных. Аппаратная сложность в виде условных вентилях, образующих *OFFP* согласно рис. 4 составляет

$$WW_2 = 2 \cdot N^2 + 12 \cdot N,$$

где  $2 \cdot (N^2 + N)$  вентилях содержат дешифраторы битовой транспозиции первой и второй групп, а  $2 \cdot 5 \cdot N$  вентилях – блоки сборки битовой транспозиции первой и второй групп.

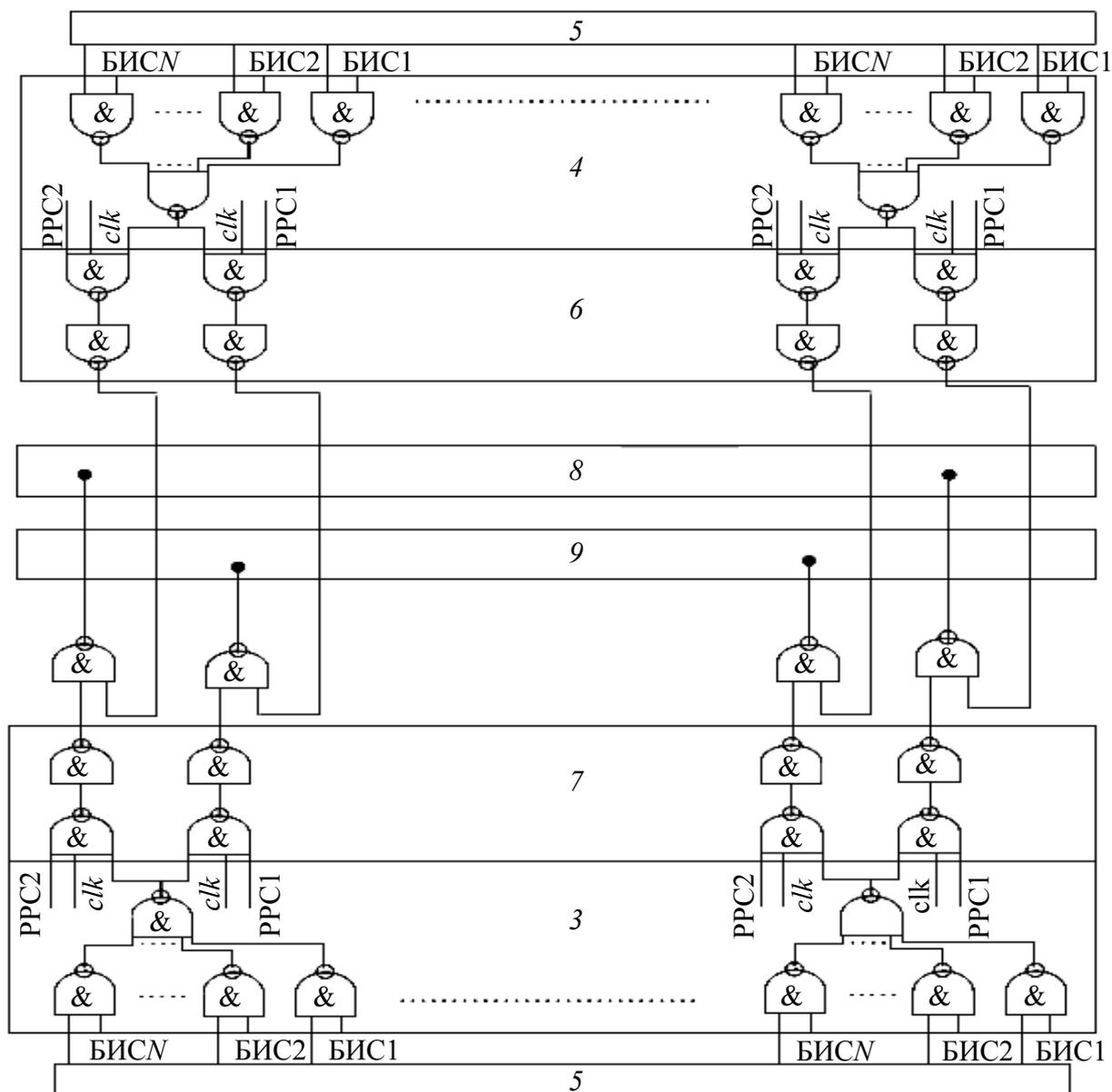


Рис. 4. Логическая схема *OFFP* с двойной буферизацией

При отсутствии двойной буферизации число условных вентилях составит

$$WW = N^2 + 2N.$$

Согласно логической схеме *OFFP* управляющие коды с модуля регистров кодов дешифрации поступают на входы блоков дешифраторов первой и второй групп 3, 4, причем в каждой группе значение логической единицы принимает только один вход, номер которого совпадает с номером транспонируемого бита исходного вектора данных. Таким образом, дескриптор формата представляет собой бинарную матрицу, в каждой строке которой содержится только один бит, имеющий единичный логический уровень:

$$FD_j = \begin{bmatrix} \text{БИС}01 & \dots & \text{БИС}0N \\ \dots & \dots & \dots \\ \text{БИС}N1 & \dots & \text{БИС}NN \end{bmatrix}. \quad (1)$$

До преобразований исходного кода на соответствующие группы входов подаются управляющие коды соответствующей строки матрицы дескриптора формата  $FD_j$ . С точки зрения аппаратной реализации для хранения матрицы  $FD_j$  требуется большой объем памяти  $N^2$  битов, что дополнительно усложняет техническую реализацию предлагаемого *OFFP* и предъявляет жесткие требования к запоминающему устройству (ЗУ) сервера форматирования, выполняющего преобразования данных [16]. Кроме того, следует заметить, что при использовании описанного *OFFP* необходимо применять дешифраторы битов управления, которые приводят к дополнительным задержкам и снижению быстродействия схемы [22, 23].

Снизить технические требования к ЗУ сервера форматирования и *OFFP* возможно путем включения в *OFFP*  $N$  дополнительных дешифраторов компактных дескрипторов формата, представляющих собой множество уникальных бинарных строк  $S_j = \{b_i \mid i = \overline{1, K}\}_j$ , тогда

$$FD_j = \{S_j \mid j \in \{1, \dots, N\} \& \forall m, n \in \{1, \dots, N\} (S_m \neq S_n \vee m = n)\}, \quad (2)$$

где  $K = \log_2(N)$ . Дешифраторы дескрипторов преобразуют строки  $S_j$  в строки БИС $j$ 1–БИС $j$  $N$  матрицы (1).

Схема дешифратора элемента дескриптора  $S_j$  для случая  $K = 4$ ,  $N = 16$  приведена на рис. 5.

Дешифратор состоит из однотипных логических элементов, образующих двоичное дерево и реализующих логические формулы  $Y_1 = \bar{X}, Y_2 = X$  – для первого элемента и  $Y_1 = \bar{X}_1 \times X_2, Y_2 = X_1 \times X_2$  – для остальных элементов. Для дешифрации одной бинарной строки из  $S_j$  битов необходимо  $(N-1)$  элементов.

Число условных вентилях дешифраторов дескриптора, необходимых в этом случае, равно  $N(N-1)$ . При этом общее число вентилях *OFFP* составит

$$N \cdot (N - 1) + WW_2 = 3N^2 + 11N. \quad (3)$$

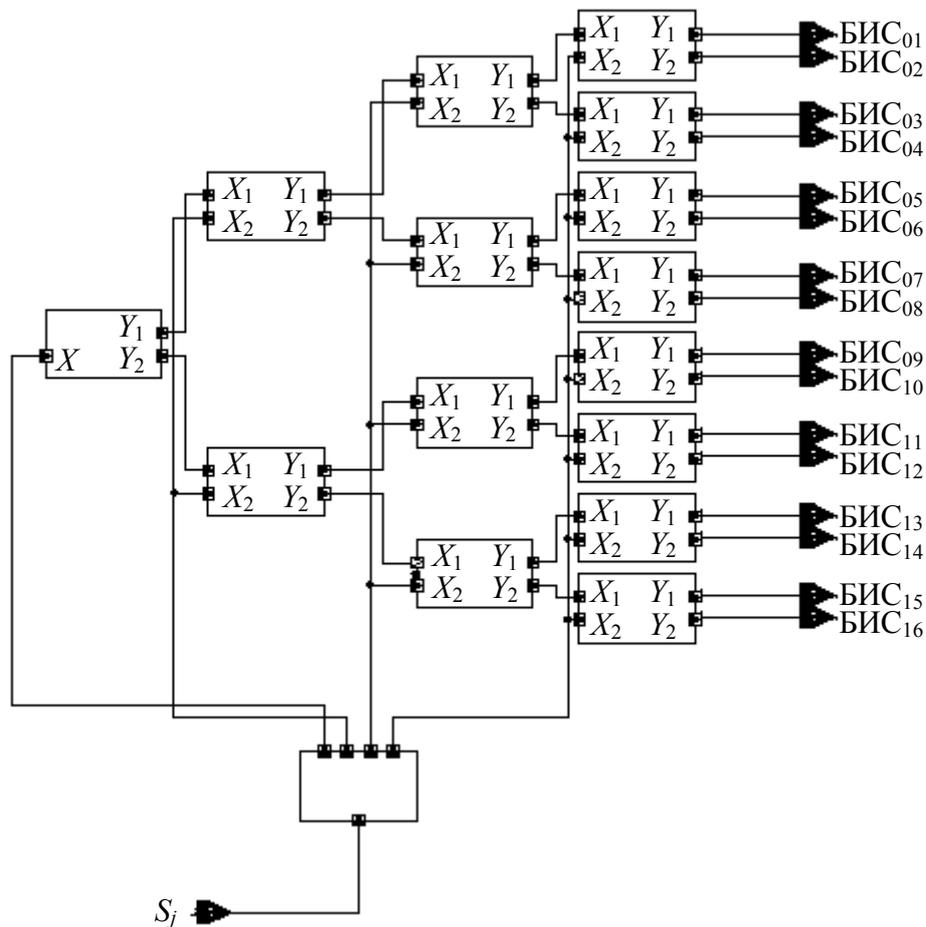


Рис. 5. Схема дешифратора дескрипторов *OFFP*

В случае отсутствия двойной буферизации общее число вентиляей *OFFP* составит

$$N \cdot (N-1) + WW = 2N^2 + N. \quad (4)$$

Сравнительная характеристика функциональных *FP* приведена в работе [4]. Одним из наиболее перспективных является *FP*, предложенный в [24]. Он выполняет перестановку исходного вектора данных за  $N$  тактов *clk* и содержит около  $N^2$  условных вентиляей. Таким образом, предложенный функциональный *FP* с последовательной загрузкой при той же производительности с учетом буферного регистра имеет  $2N-1$  условных вентиляей, что дает возможность создания данного *FP* для перестановки больших блоков данных. Описанный выше *OFFP* при одинаковом росте аппаратной сложности (порядка  $N^2$ ) имеет производительность в  $N$  раз выше, так как осуществляет перестановку исходного вектора данных за один такт внешнего генератора тактовых импульсов.

Исследование способов построения высокопроизводительной аппаратуры для обеспечения представлений структурных элементов данных в ЭВМ в процессе их хранения и оперативной обработки показало, что наибольшей производительностью обладают устройства с параллельным преобразованием. С точки зрения аппаратурной реализации наиболее эффек-

тивным оказывается предложенный алгоритм последовательного разбиения исходного множества на два подмножества.

Установлено, что за счет конвейерной обработки данных в узлах дешифрации удастся сократить время выполнения перестановки в несколько раз, так как общее время задержки определяется временем задержки на каждом уровне преобразования.

Показано, что число логических элементов узлов дешифрации растет линейно с ростом длины преобразования  $N$ . Это позволяет реализовать устройства для перестановки больших блоков данных.

Предложенные устройства преобразования форматов представления данных имеют преимущества по сравнению с существующими решениями, так как отличаются высокой производительностью, простотой аппаратной реализации и масштабируемостью. В предложенных моделях соединения между элементами различных уровней коммутационных матриц заданы не жестко, что дает возможность их изменения для оптимизации топологии матрицы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.

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. 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.

4. 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.

5. Курейчик В. М., Глушань В. М., Щербаков Л. И. Комбинаторные аппаратные модели и алгоритмы в САПР. М. : Радио и связь, 1990. 216 с.

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

7. Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. М. : Мир, 1980. 476 с.

8. 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.

9. 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.

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

12. 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.

13. 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.

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. 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.

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

18. Сотов Л. С., Хвалин А. Л. Средства разработки и исследования архитектурных моделей в САПР System Studio. Часть 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.

19. 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.

20. 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.

21. Пат. 2488161 Российская Федерация, МПК G0 6F 11/00. Устройство перестановок и сдвигов битов данных в микропроцессорах / заявитель Сотов Л. С. ; патентообладатель Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2011145864/08 ; заявл. 14.11.2011 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 27 с.

22. *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.

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

24. А.с. 1418733 СССР, МКИЗ G06F 15/20. Устройство для перебора перестановок / В. М. Глушань, А. Л. Хамутов (СССР); заявитель Таганрогский радиотехнический институт им. В. Д. Калмыкова. – № 4182809 ; заявл. 15.01.1987 ; опубл. 23.08.1988, Бюл. № 31.

УДК 531.38

**БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ  
ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**  
(хронометрический способ автономной ориентации)

**А. А. Игнатьев, Г. М. Прокuryakov\*, А. В. Васильев, А. А. Маслов**

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

Для вращающихся подвижных объектов (наземных и подземных, надводных и подводных, воздушных и комбинированных, баллистических и космических) разработан **хронометрический способ** решения задачи автономной ориентации на основе обработки магнитоинерциальной информации, получаемой от трехосных блоков векторных датчиков (акселерометров, магнитометров, гироскопов). Приведены алгоритмы обработки комплексной информации для хронометрического способа, а также даны оценки условий их практической реализации в бесплатформенной геофизической системе ориентации.

*Ключевые слова:* вращающийся подвижный объект, бесплатформенная система ориентации, трехосные блоки акселерометров, магнитометров, гироскопов, алгоритм, матрица, хроноимпульсы, частота вращения.

**Strapdown Attitude Control System Rotating Moving Objects**  
(Chronometric Method of Autonomous Orientation)

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

Rotating moving objects (surface and underground, above water and underwater, air and combined ballistic and space) developed by **chronometric method** of solving the problem of Autonomous orientation based on the processing of magnetoinertial information obtained from triaxial blocks of vector sensors (accelerometers, magnetometers, gyroscopes). Algorithms of processing of complex information for chronometric method, as well as the conditions for its practical application in strapdown geophysical system orientation.

*Key words:* rotating the movable object, strapdown attitude control system, triaxial blocks accelerometers, magnetometers, gyroscopes, algorithm, matrix, chronopulses, frequency of rotation.

Вращающиеся подвижные объекты (ВПО) занимают особое место среди множества подвижных аппаратов. К их числу следует отнести снаряды и инклинометры, вращающиеся в буровой скважине или трубопроводе, вращающиеся объекты систем высокоточного оружия (ВПО ВТО), вращающиеся космические аппараты в режиме закрутки, вращающиеся части подвижного объекта (несущие и гребные винты, сканирующие и вращающиеся платформы с антеннами, телескопами, актинометрической аппаратурой и пр.). Частоты  $\nu_0$  принудительного вращения, качаний и сканирования таких ВПО могут составлять величины от долей герц до единиц и даже десятков герц (Гц).

Применительно к ВПО ВТО ставится задача определения в каждый момент времени не только его угловой скорости  $\omega_0$  и текущего угла вращения  $\gamma$  (угла крена), но и определения его ориентации (т. е. определение углов курса  $\psi$  и тангажа  $\vartheta$ ), а также управления ими при маневрировании подвижного объекта (ПО). Для решения задач ориентации и стабилизации ВПО ВТО в настоящее время на практике находят применение гироскопические (ГСО) и бесплатформенные инерциальные (БИСО) системы ориентации [1, 2]. Однако ГСО отличаются большими габаритами и массами, а для БИСО характерно явление накопления во времени погрешностей ориентации ( $\Delta\psi(t)$ ,  $\Delta\vartheta(t)$ ,  $\Delta\gamma(t)$ ). Кроме того, основным недостатком ГСО связан с явлением выбиваемости систем в условиях пространственного маневрирования объекта [2].

Особенность решения задач ориентации, стабилизации и управления ВПО ВТО заключается в том, что они должны решаться не только относительно неподвижной системы координат, связанной с Землей, но и относительно линии визирования цели (ЛВЦ), на которую наводится ВПО. В настоящее время задачи ориентации, стабилизации и управления ВПО относительно ЛВЦ решаются на основе использования оптических головок самонаведения (ОГС), применение которых еще больше расширяет перечень недостатков, ограничений, вопросов и проблем [3–7].

В качестве альтернативы для ГСО и БИСО в направлении устранения указанных недостатков с учетом отмеченных особенностей могут рассматриваться **бесплатформенные геофизические системы ориентации** (БГСО), построенные на основе комплексирования датчиков магнитоинерциальной информации: трехосных блоков магнитометров (ТБМ), акселерометров (ТБА) и гироскопов (ТБГ).

Известным схемотехническим решениям построения БГСО, в которых предлагается реализовать алгоритмы автономной обработки комплексной геофизической информации [3–6], присущи свои недостатки. В работе [5] предлагается способ определения параметров ориентации (углов тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$ ) быстловращающихся подвижных объектов на основе показаний БИСО, в состав которой входят шесть акселерометров с неортогональными осями чувствительностей и один гироскоп рысканья. Однако предлагаемый способ решает только задачу аналитического горизонтирования ВПО, а не задачу аналитического компасирования его, так как не позволяет определить курс объекта (ни истинный, ни магнитный).

В статье [6] решается аналогичная задача аналитического горизонтирования ПО, но с использованием показаний не инерциальных, а магнито-чувствительных датчиков. При этом при вычисления углов  $\vartheta$  и  $\gamma$  ПО предполагается известным угол магнитного курса  $\Phi$ .

В [7] предлагается способ аналитического горизонт-компасирования (АГК) на основе обработки магнитометрической и акселерометрической информации. При этом используется упрощенный и неточный алгоритм аналитического магнитокомпасирования с вычислением функции  $\text{tg}\Phi$  (разрывной и неоднозначной) без учета магнитных свойств подвижного основания и геометрических технологических погрешностей сборки и монтажа блоков ТБМ и ТБА. Алгоритмы аналитического горизонтирования (АГ) ПО имеют существенные ограничения по условиям эксплуатации, так как предполагают реализацию эталонных режимов движения, не учитывающих реальную динамику поступательного и вращательного движения объекта.

Для более полного и точного решения задачи бесплатформенной ориентации ВПО на основе использования геофизической информации и применения безинерциальной (безынтегральной!) технологии ее обработки предположим, что БГСО построена по схеме измерения параметров трех векторов –  $T_{\text{МПЗ}}$ ,  $\mathbf{a}$ ,  $\boldsymbol{\omega}$  (напряженности магнитного поля Земли (МПЗ), кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости вращения объекта). Измерительные оси блоков ТБМ, ТБА и ТБГ параллельны соответствующим осям связанного трехгранника XYZ. Такая БГСО может быть с успехом использована для полного решения задачи **автономной ориентации** ВПО [8, 9].

Сущность принятой концепции автономной ориентации ВПО на основе обработки комплексной геофизической информации и подход к разработке алгоритмов ориентации во всех модификациях изложены в [10]. На основе описанной концепции решения задачи автономной ориентации с учетом разработанных вариантов алгоритмов рассмотрим расширенное алгоритмическое обеспечение для решения поставленной задачи ориентации ВПО. Для любого ВПО в составе переносного зенитно-ракетного комплекса можно выделить два принципиально различных режима работы объекта и его системы ориентации, выполняемых последовательно в два этапа [10]:

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

В работе [10] обоснован подход к решению задачи разработки алгоритмов АГК ВПО на основе использования комплексной магнито-тахо-акселерометрической информации, получаемой от трех пар блоков (ТБА + ТБГ, ТБМ + ТБА, ТБМ + ТБГ), а также разработан рабочий алгоритм магнито-акселерометрического АГК (этап начальной выставки). Алгоритм тахо-акселерометрического АГК по сигналам блоков ТБА + ТБГ широко используется на практике [11, 12]. В результате выполнения операции **начальной выставки** на основе использования различных алгоритмов АГК, их модификаций и комбинаций оказываются известными в условиях функциональной избыточности информации те начальные значения углов ориентации  $\psi_0$ ,  $\vartheta_0$ ,  $\gamma_0$ , с которыми ВПО и ее БГСО переходят к работе в основном режиме – в режиме автономной работы.

В режиме **автономной работы** при сходе ВПО с направляющих ПЗРК происходит принудительное раскручивание объекта до угловой скорости  $\omega_0$  вокруг продольной оси  $X$  объекта. Вращение ВПО вокруг продольной оси в режиме автономной работы обеспечивает условия для реализации одного **силового** (стабилизирующего объект в пространстве по курсу  $\psi$  и тангажу  $\vartheta$  с учетом ее кинетического момента  $\mathbf{H}_X = I_X \cdot \omega_0$ ) и трех **информационных** эффектов (рис. 1):

– **хронометрического** (объект выступает как механический храни- тель времени и частоты, т. е. хронометр);

– **модулирующего** (вращающийся объект как механический модуля- тор обеспечивает модуляцию сигналов ТБМ, ТБА, ТБГ и головки самона- ведения);

– **гармонического** (объект выступает как механическое устройство, способствующее приведению показаний блоков ТБМ, ТБА и ТБГ к гармо- нической форме).

Показания блоков ТБМ, ТБА, ТБГ в режиме автономной работы БГСО формируются в соответствии с проявлением хронометрического, мо- дулирующего и гармонического эффектов вращения в виде сигналов про- дольных (не модулированных) и поперечных (гармонически изменяющих- ся, см. рис. 1) магнитометров, акселерометров и гироскопов, подчиняю- щихся уравнениям Пуассона, кинематическим уравнениям Эйлера и век- торно-матричным уравнениям преобразования координат [10]:

$$\mathbf{T}_m = [T_X \quad T_Y \quad T_Z]^T = B_M \cdot M \cdot [(S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ} + \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}]; \quad (1)$$

$$\mathbf{a}_m = [a_X \quad a_Y \quad a_Z]^T = B_a \cdot M \cdot [A \cdot \mathbf{a}_s + \omega_0^2 \cdot \mathbf{r}_a]; \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\omega}_m = [\omega_X \quad \omega_Y \quad \omega_Z]^T = B_{\Gamma} \cdot M \cdot [A \cdot \boldsymbol{\omega}_s + \boldsymbol{\omega}_0], \quad (3)$$

где  $\mathbf{T}_m$ ,  $\mathbf{a}_m$ ,  $\boldsymbol{\omega}_m$  – векторы напряженности результирующего магнитного по- ля, кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости вращения ВПО, приведенные к точкам установки на ПО ТБМ, ТБА и ТБГ соответственно;  $T_X$ ,  $T_Y$ ,  $T_Z$ ,  $a_X$ ,  $a_Y$ ,  $a_Z$ ,  $\omega_X$ ,  $\omega_Y$ ,  $\omega_Z$  – проекции векторов  $\mathbf{T}_m$ ,  $\mathbf{a}_m$ ,  $\boldsymbol{\omega}_m$  на оси свя- занного трехгранника  $m = XYZ$  (показания блоков ТБМ, ТБА, ТБГ соответ- ственно);  $B_M$ ,  $B_a$ ,  $B_{\Gamma}$  – матрицы сборки блоков;  $M$  – матрица монтажа (уста- новки) на ПО модуля (ТБМ + ТБА + ТБГ);  $\mathbf{T}_{МПЗ}$ ,  $\mathbf{a}_s$ ,  $\boldsymbol{\omega}_s$  – соответствующие векторы, заданные в осях географического трехгранника  $s = NHE$ ;  $\mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}$  – вектор напряженности постоянной составляющей магнитного поля объекта (МПО);  $\boldsymbol{\omega}_0$  – вектор относительной угловой скорости собственного враще- ния ВПО вокруг продольной оси;  $\mathbf{r}_a$  – радиус-вектор точки размещения ТБА относительно центра масс ВПО в связанном трехграннике  $XYZ$ ,  $\mathbf{r}_a = [0 \quad y_a \quad z_a]^T$ ;  $A$  – матрица ориентации ВПО ( $3 \times 3$ );  $S$  – матрица коэффи- циентов Пуассона ( $3 \times 3$ );  $E$  – единичная матрица ( $3 \times 3$ ).

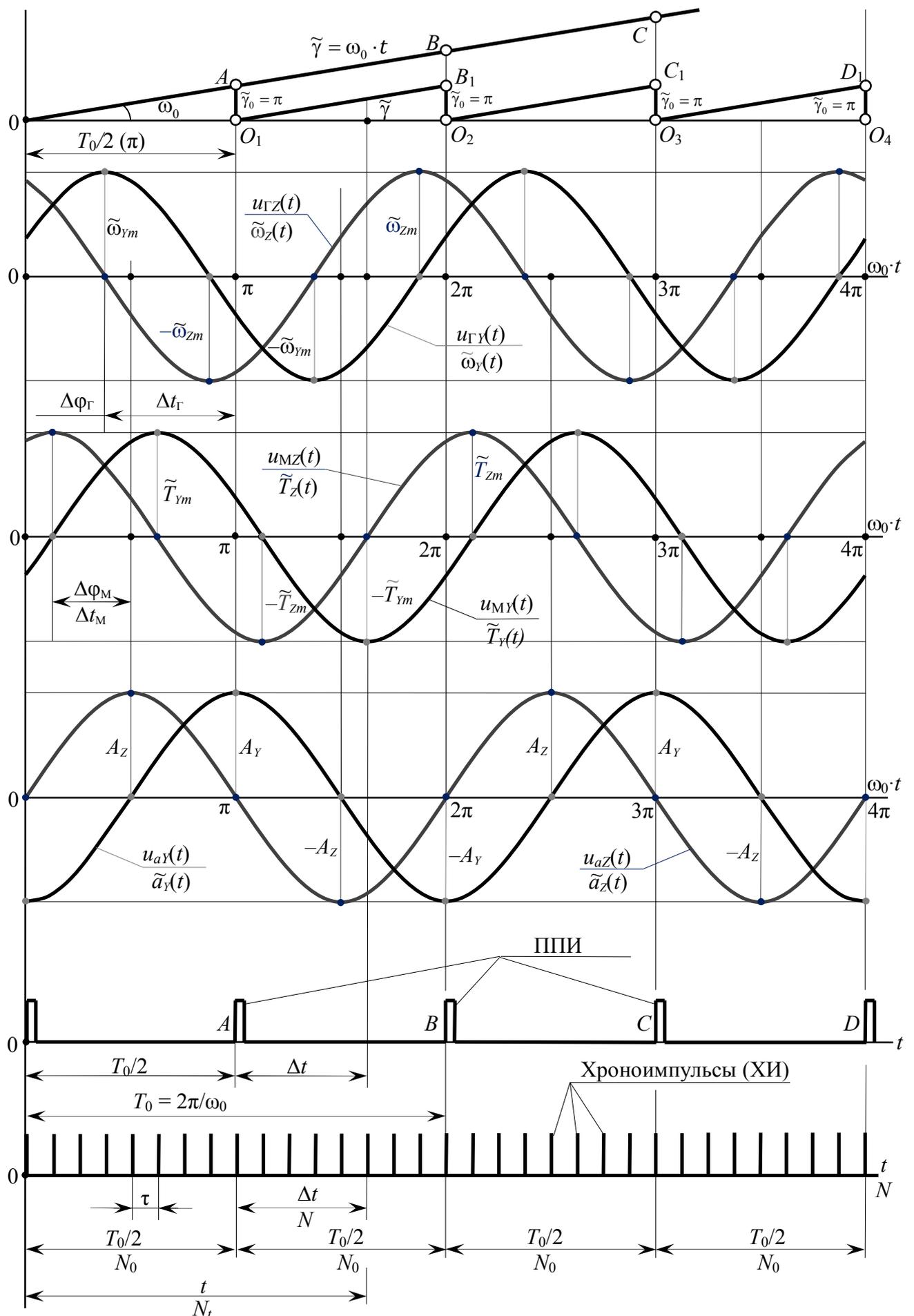


Рис. 1. Выходные и управляющие сигналы БГСО в режиме автономной работы

Для схемы Эйлера–Крылова матрица  $A$  ориентации ВПО может быть выражена через матрицы курса ( $A_\psi$ ), тангажа ( $A_\vartheta$ ) и крена ( $A_\gamma$ ):

$$A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi = [a_{ij}]_3^3, \quad (4)$$

где  $a_{ij}$  – направляющие косинусы матрицы ориентации [13–17].

Так как ВПО выступает как хронометр и модулятор, то в соответствии с хронометрическим и модулирующим эффектами вращения для измерения временных отрезков и последующего вычисления соответствующих фазовых сдвигов можно в состав БГСО ввести хронометрический канал, формирующий ряды хроноимпульсов (ХИ) и полупериодных импульсов (ППИ) (см. рис. 1). Частота следования ХИ задается постоянной с помощью генератора хроноимпульсов (ГХИ) и выбирается на уровне нескольких килогерц и более ( $\nu_{\text{ХИ}} \geq 1$  кГц). Частота же следования ППИ составляет величину, равную двойной частоте вращения ВПО ( $\nu_{\text{ППИ}} = 2\nu_0$ ;  $\nu_0 = \omega_0/(2\pi)$ ).

Процесс хронометрирования вращения ВПО и гармонических сигналов блоков (ТБМ, ТБА, ТБГ) для оценки их временных и фазовых параметров с помощью таймера (высокочастотного счетчика импульсов) сводится к определению полупериода  $T_0/2$  вращения ВПО, текущего времени  $t$ , отсчитываемого с момента пуска объекта, интервального времени  $\Delta t$  в пределах каждого полуоборота ( $0 \leq \Delta t \leq T_0/2$ ), временных отрезков  $\Delta t_{\text{М}}$ ,  $\Delta t_{\text{Г}}$  сигналов ТБМ и ТБГ по алгоритму хронометрирования АХ (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} T_0 &= 2N_0 \cdot \tau, \\ t &= N_t \cdot \tau, \\ \Delta t &= N \cdot \tau, \\ \Delta t_{\text{М}} &= N_{\text{М}} \cdot \tau, \\ \Delta t_{\text{Г}} &= N_{\text{Г}} \cdot \tau, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tau$  – длительность одного ХИ;  $N_0$ ,  $N_t$ ,  $N$ ,  $N_{\text{М}}$ ,  $N_{\text{Г}}$  – числа ХИ, посчитанных таймером за полупериод вращения  $T_0/2$ , текущее время  $t$  и интервальные отрезки времени  $\Delta t$ ,  $\Delta t_{\text{М}}$ ,  $\Delta t_{\text{Г}}$ .

С учетом конкретной ориентации продольной оси  $X$  ВПО в пространстве (т. е. с учетом мгновенной ориентации вектора скорости  $\mathbf{v}$  в пространстве по углам  $\psi$  и  $\vartheta$ ) относительные фазовые сдвиги сигналов поперечных магнитометров и гироскопов относительно соответствующих синхронных сигналов акселерометров могут быть как положительными

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\text{М}} &= \varphi_{\text{М}} - \varphi_{\text{а}} > 0, \\ \Delta\varphi_{\text{Г}} &= \varphi_{\text{Г}} - \varphi_{\text{а}} > 0, \end{aligned}$$

что соответствует опережению сигналов датчиков по фазе, так и отрицательными

$$\Delta\varphi_M = \varphi_M - \varphi_a < 0,$$

$$\Delta\varphi_\Gamma = \varphi_\Gamma - \varphi_a < 0,$$

что соответствует запаздыванию сигналов этих датчиков по фазе.

Тогда частота  $\nu_0$ , угловая скорость  $\omega_0$  вращения ВПО и частота следования ППИ  $\nu_{\text{ППИ}}$  рассчитываются по следующим формулам:

$$\nu_0 = 1/T_0, \quad (6)$$

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 = 2\pi/T_0 = \pi/(N_0 \cdot \tau), \quad (7)$$

$$\nu_{\text{ППИ}} = 2\nu_0 = 2/T_0 = 1/(N_0 \cdot \tau). \quad (8)$$

На основе использования **хронометрического способа** решения задачи автономной ориентации ВПО по информации тахометрического ( $\omega_x = \omega_0$ ) и хронометрического ( $N, N_0, T_0, \omega_0, \Delta t$ ) каналов измерений можно вычислить приближенное значение угла вращения  $\tilde{\gamma}$  объекта:

$$\tilde{\gamma} = \omega_x \cdot t = \omega_0 \cdot t = \frac{N}{N_0} \pi. \quad (9)$$

График изменения вычисленных приближенных значений углов вращения  $\tilde{\gamma}(t)$  может быть представлен в виде непрерывной прямой линии  $0ABCD\dots$  ( $\tilde{\gamma} = \omega_0 \cdot t$ ) или в виде периодической пилообразной линии  $0AO_1B_1O_2C_1O_3D_1\dots$  с периодом, равным  $T_0/2$  ( $\tilde{\gamma} = \frac{N}{N_0} \pi$ ) (см. рис. 1).

Текущее мгновенное значение угла вращения (крена)  $\gamma$  ВПО можно вычислить на основании линейной функции (9) по формуле

$$\gamma = \tilde{\gamma} + \Delta\gamma = \omega_0 \cdot t + \Delta\gamma, \quad (10)$$

если ввести поправку  $\Delta\gamma$  к приближенно вычислительному значению угла  $\tilde{\gamma}$  [10]:

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_1 &= \arcsin\left(\frac{\sin \Phi \cdot \cos J_m}{\sin \chi}\right), \\ \Delta\gamma_2 &= \arcsin\left(\frac{\sin \Phi}{\sin^2 J_m + \sin^2 \Phi \cdot \cos^2 J_m \cdot \cos^2 \vartheta}\right), \\ \Delta\gamma_3 &= \arccos\left(\frac{\sin J_m + \sin \vartheta \cdot \cos \chi}{\cos \vartheta \cdot \sin \chi}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\chi$  – угол между векторами  $\omega_0$  и  $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ .

Функции  $\sin\chi$  и  $\cos\chi$  можно вычислить по следующим формулам [10]:

$$\sin\chi = \frac{\left| \left[ \boldsymbol{\omega}_0^s \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^s \right] \right|}{T_{МПЗ} \cdot \omega_0} = \frac{\left| \left[ \boldsymbol{\omega}_0^m \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^m \right] \right|}{T_{МПЗ} \cdot \omega_0} \neq 0, \quad (12)$$

$$\cos\chi = \frac{\left( \mathbf{T}_{МПЗ}^s \cdot \boldsymbol{\omega}_0^s \right)}{T_{МПЗ} \cdot \omega_0} = \frac{\left( \mathbf{T}_{МПЗ}^m \cdot \boldsymbol{\omega}_0^m \right)}{T_{МПЗ} \cdot \omega_0} \neq 1. \quad (13)$$

Неравенства  $\sin\chi \neq 0$ ,  $\cos\chi \neq 1$ , характеризуют условия непопадания осей чувствительностей ТБМ в мертвую зону (в которой векторы  $\boldsymbol{\omega}_0$  и  $\mathbf{T}_{МПЗ}$  совпадают по направлению).

Оценка среднего значения поправки  $\Delta\hat{\gamma}$  равна

$$\Delta\hat{\gamma} = \text{med}(\Delta\gamma_1; \Delta\gamma_2; \Delta\gamma_3). \quad (14)$$

Знание текущих значений углов  $\gamma$  вращения ВПО в каждый момент времени  $t$  с учетом показаний ТБМ позволяет вычислить углы маневрирования объекта ( $\psi$ ,  $\vartheta$ ) в линеаризованной или конечной формах. Недостаток хронометрического способа определения угла  $\gamma$  вращения ВПО заключается в необходимости введения коррекции предварительно вычисленных значений  $\tilde{\gamma}$  углов крена путем определения и введения поправок  $\Delta\gamma$ .

БГСО на основе комплексирования блоков ТБМ + ТБА + ТБГ может быть построена в виде малогабаритной или даже миниатюрной микропроцессорной измерительно-вычислительной системы (рис. 2).

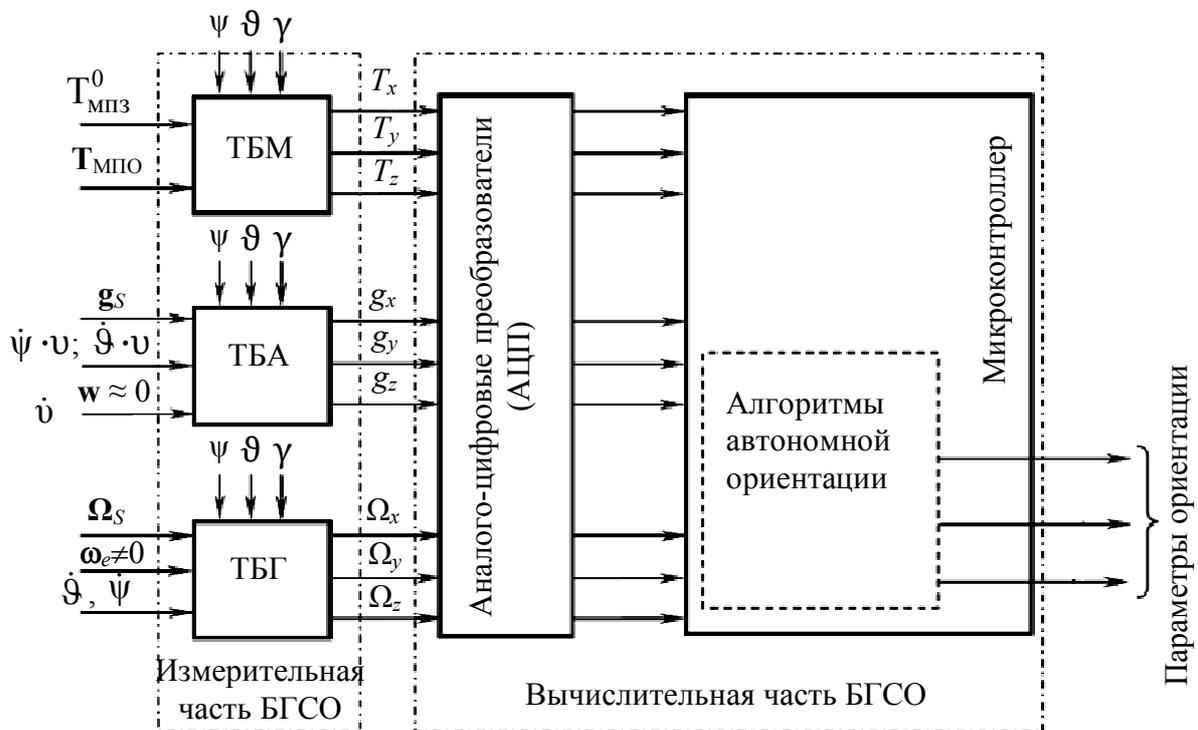


Рис. 2. Блок-схема БГСО

Алгоритмы обработки комплексной (магнито-, тахо-, акселерометрической) информации, на основе которых разработано программно-алгоритмическое обеспечение микроконтроллера БГСО, доставляют системе ориентации свойства автономности, самопроверяемости, отказоустойчивости, высокой точности и надежности, гибкости и живучести [15–17].

Математическое моделирование функционирования малогабаритной автономной БГСО ВПО по разработанным алгоритмам автономной ориентации в условиях компьютерной имитации различных режимов работы объекта (начальной выставки, автономной стабилизации и управления) показало, что для реальных частот вращения ВПО  $\nu_0 = 20,40$  Гц максимальные погрешности определения углов ориентации объекта по алгоритмам АХ, АГ и АВ при самых неблагоприятных условиях не превышают предельных значений  $\Delta\gamma_{max} \leq 0,05^\circ$ ,  $\Delta\psi_{max} \leq 0,05^\circ$ ,  $\Delta\theta_{max} \leq 0,05^\circ$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов В. А. Система стабилизации и наведения линии визирования с уменьшенными габаритами и особенности ее динамики // XV юбилейная С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 26–28 мая 2008 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 166–168.
2. Белобрагин В. Н., Зайцев В. Д., Распопов В. Я., Горин В. И., Горин А. А., Дмитриев В. А., Сорокин В. И., Ермилов С. П. Опыт разработки гироприборов для вращающихся по крену изделий // XII С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам по интегрированным навигационным системам, 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. С. 183–194.
3. Царев И. В., Шило В. В., Бортовик В. Б., Дмитриев В. А., Ермилов С. П., Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Алалуев Р. В. Разработка магнитометрического измерителя текущего положения // XII С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. С. 215–217.
4. Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Алалуев Р. В. Малогабаритная система ориентации // Датчики и системы. 2004, № 8. С. 2–5.
5. Пат. RU 2256881 С2 Российская Федерация, МПК G01C 21/16. Способ определения параметров ориентации и навигации и бесплатформенная инерциальная навигационная система для быстровращающихся объектов / заявители Ачильдиев В. М., Мезенцев А. П., Решетников В. И., Сысоев И. В., Трешкин А. И. ; патентообладатель ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова». – № 2003107688/28 ; заявл. 21.03.2003 ; опубл. 20.07.2005, Бюл. 20. – 11 с.
6. Погорелов М. Г., Шведов А. П., Малютин Д. М. Система ориентации подвижного объекта по показаниям магнитных датчиков // Датчики и системы. 2004. № 5. С. 51–54.
7. Пат. RU 2130588 С1 Российская Федерация, МПК G01C 21/08, G01C 21/12, G01C 17/38. Способ измерения магнитного курса подвижного объекта / заявители Архипов В. А., Ветошкина Н. К., Зузлов В. Ф., Лебедев С. О., Потапов А. А., Олаев В. А. ; патентообладатель ОАО «Чебоксарский приборостроительный завод "Элара"». – № 98108097/28 ; заявл. 23.04.1998 ; опубл. 20.05.1999, Бюл. 16. – 12 с.
8. Пат. RU 2527369 С1 Российская Федерация, МПК F42В 15/01, G01C 21/08. Способ определения угла крена вращающегося по крену летательного аппарата / заявители Шипунов А. Г., Бабичев В. И., Морозов В. И., Шигин А. В., Рабинович В. И., Долгова Т. С.,

Акулинин С. И., Монькин В. Б., Бальзамов И. А. ; патентообладатель ОАО «Конструкторское бюро приборостроения имени ак. А. Г. Шипунова». – № 2013115672/11 ; заявл. 09.04.2013 ; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. – 17 с.

9. *Кринецкий Е. И.* Системы самонаведения. М. : Машиностроение, 1970. 236 с.

10. *Игнатъев А. А., Проскураков Г. М., Васильев А. В.* Алгоритмы работы миниатюрной системы ориентации вращающихся подвижных объектов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 78–91.

11. *Матвеев В. В., Распопов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2009. 280 с.

12. *Розенцвейн В. Г.* Современное состояние скважинных гироскопических навигационных систем // Применение гравиинерциальных технологий в геофизике : сб. ст. и докл. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. С. 146–167.

13. *Захарин М. И., Захарин Ф. М.* Кинематика инерциальных систем навигации. М. : Машиностроение, 1968. 235 с.

14. *Игнатъев А. А., Проскураков Г. М., Маслов А. А.* Миниатюрная курсоверткаль для квазистационарных объектов // 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. 64–74.

15. *Анучин О. Н., Емельянцева Г. И.* Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 357 с.

16. *Проскураков Г. М., Игнатъев А. А., Маслов А. А.* Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (гармонический способ автономной ориентации) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 81–89.

17. *Игнатъев А. А., Проскураков Г. М.* Гетеромагнитометрия : алгоритмы, методики, калибровки блоков магнитометров. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. 152 с.

УДК 50.41.00

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ШИФРОВ

**В. А. Малярчук, А. А. Солопов\***

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

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

Предложен способ построения топологии сети для реализации высокоскоростных криптографических шифров. В частном случае предложенное устройство дает возможность реализовать произвольные перестановки данных и является обобщением существующих решений, которые позволяют упростить процедуру «рассеяния» избыточности представления информации.

*Ключевые слова:* формирователь перестановок, баньян-переключатель, шифр перестановки, псевдослучайная перестановка.

## Device for Implementation of High-Speed Ciphers

V. A. Malyarchuk, A. A. Solopov

The way of creation of topology of a network for implementation of high-speed cryptographic codes is offered. In that specific case the offered device gives the chance to realize any shifts of data, and in this sense is synthesis of the existing decisions which allows to simplify realization of procedure of «dispersion» of redundancy of submission of information.

*Key words:* permutations, banyan switch, transposition cipher, pseudo-random shuffling.

Увеличение скорости выполнения шифрования является одним из актуальных направлений прикладной криптографии. Различными авторами предлагаются алгоритмы скоростного блочного шифрования, в которых используются операции управляемой перестановки [1, 2]. Наибольшей производительностью обладают аппаратные устройства [3, 4].

В криптографии для шифрования больших блоков данных используются алгоритмы с симметричным ключом. В симметричных шифрах применяются методы, обеспечивающие «запутанность» и «рассеяние». «Запутанность» затеняет отношения между исходным сообщением и зашифрованным текстом, например, путем замены произвольных битов в исходном тексте. «Рассеяние» распространяет избыточность исходного текста по зашифрованному тексту. При этом обычно используются перестановки битов исходного сообщения.

Необходимость высокоскоростного преобразования форматов представления данных с использованием перестановок возникает в системах управления базами данных [5, 6], защиты информации [7], генерации шумов [8], кодирования [9], системах автоматизированного проектирования и комбинаторных автоматах [10–12].

Битовые перестановки сложны для программной реализации. Разработка аппаратных ускорителей актуальна для реализации этих операций [13]. Сложность обусловлена тем, что обычные микропроцессоры работают с машинными словами. Каждый бит должен быть извлечен из исходного регистра, перемещен на новое место в регистре назначения и объединен с ранее перестановленными битами. Для этого необходимо выполнение команды, состоящей из 4 инструкций для каждого бита машинного слова (генерация маски, И, сдвиг, ИЛИ), и  $4n$  инструкций для выполнения произвольной перестановки  $n$  битов. Известны *RISC* процессоры, осуществляющие перестановку  $n$  битов за несколько операций [14–16]. Тем не менее операция перестановки сложна для программного выполнения. Представляет интерес разработка устройств, дающих возможность быстро выполнять перестановки бинарных строк длиной  $n$  битов. Обзор аппаратных формирователей перестановок (*FP*) дан в [17, 18]. Особый интерес представляют способы синтеза формирователей перестановок [19].

В данной работе предложены модели кросс-кластерных формирователей перестановок, предназначенных для динамического преобразования форматов данных в ЭВМ [20, 21].

*Комбинаторная модель  
однотактного кросс-кластерного преобразователя*

Представим данные в ЭВМ в виде семейства множеств  $B_n: [n] \rightarrow B$ , где  $[n]$  – множество чисел натурального ряда  $[n] = \{1, 2, \dots, n\}$ . Отображение  $B_n$  можно рассматривать в виде множества, состоящего из упорядоченных пар  $B_n = \{(i, b) \mid i \in [n] \wedge b \in B\}$ , где  $i$  – позиционный коэффициент элемента  $b$  бинарного множества в строке. Множество  $B_n$  можно представить в виде бинарной строки  $B_n \equiv (b_1, b_2, \dots, b_n)$ . В этом случае обычно предполагается, что первый элемент строки имеет позиционный коэффициент 1, второй – 2 и т. д. Такой способ представления  $B_n$  не единственный. Назовем форматом представления  $B_n$  биективное отношение, согласно которому позиционные коэффициенты  $B_n$  соответствуют номерам позиций в бинарной строке  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$ .

Согласно [22, 23] множеством форматов представления  $B_n$  назовем множество  $FX_n$  биекций  $FX_n = \{R_{FD_n} \mid R_{FD_n} : B_n \leftrightarrow B_n\}$ , где  $FD_n$  – дескриптор формата, однозначно определяющий формат представления бинарной строки  $R = R(FD_n)$ . Мощность полиморфного множества  $|FX_n| = n!$

Пусть  $C$  разбиение

$$B_n = \bigcup_{i \in [q]} C_i \wedge \forall i, j \in [q] \wedge i \neq j \rightarrow C_i \cap C_j = \emptyset.$$

Множество  $C_i$  можно рассматривать как кластер  $B_n$ . Как и в работах [24, 25], биекцию  $R_{FD_n}^{CC} : B_n \leftrightarrow B_n$  будем называть кросс-кластерным битовым преобразованием, если  $\exists b_i \in C_j$  такое, что  $R_{FD_n}^{CC}(b_i) \notin C_j$ . Множество  $FX_{nc} = \{R_{FD_n}^{CC} \mid R_{FD_n}^{CC} \in R_{FD_n} \wedge \exists b_i \in C_j \rightarrow R_{FD_n}^{CC}(b_i) \notin C_j\}$  является подмножеством  $FX_n$

$$|FX_{nc}| = \binom{n}{|C_1|, |C_2|, \dots, |C_m|}.$$

Для осуществления кросс-кластерного преобразования между двумя кластерами  $C_1, C_2$  предлагается метод, иллюстрируемый диаграммой орграфа  $G(S, D, T, \check{A})$ , представленной на рис. 1, где  $S = (s_0, s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_{n-1})$  – линейно упорядоченное множество исходных вершин графа, которое можно рассматривать как элементы исходной строки данных;  $D = (d_0, d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{n-1})$  – линейно упорядоченное множество вершин назначения орграфа, которое можно рассматривать как элементы строки назначения;  $T$  – множество промежуточных вершин орграфа;  $\check{A}$  – множество дуг орграфа.

Вершины  $t_{ij} \in T$  можно записать в виде матрицы, имеющей  $n/2$  строк,  $k = \log_2 n$  столбцов. Каждая вершина  $t_{im}$  уровня  $m = (\overline{1, k-1})$  является смежной двум вершинам  $t_{hm+1}, t_{pm+1}$  уровня  $m + 1$ , причем на значения индексов  $h$  и  $p$  наложены ограничения:

$$2^{k-m-1} \operatorname{int}\left(\frac{i-1}{2^{k-m-1}}\right) + 1 \leq h \leq 2^{k-m-1} \operatorname{int}\left(\frac{i-1}{2^{k-m-1}} + 1\right),$$

$$2^{k-m-1} \operatorname{int}\left(\frac{(i+2^{k-m-1}-1) \bmod n}{2^{k-m-1}}\right) + 1 \leq p \leq 2^{k-m-1} \left(\operatorname{int}\left(\frac{(i+2^{k-m-1}-1) \bmod n}{2^{k-m-1}}\right) + 1\right),$$
(1)

где  $\operatorname{int}$  – функция выделения целой части;  $(j+2^{k-m-1}-1) \bmod n$  – функция вычисления остатка от частного  $\frac{i+2^{k-m-1}-1}{n}$ .

Любая вершина уровня  $m+1$  является смежной двум вершинам уровня  $m$ . Каждая из вершин множества  $S$  является смежной одной из вершин  $t_{i1}$ , причем любая из вершин  $t_{i1}$  является смежной двум вершинам множества  $S$ .

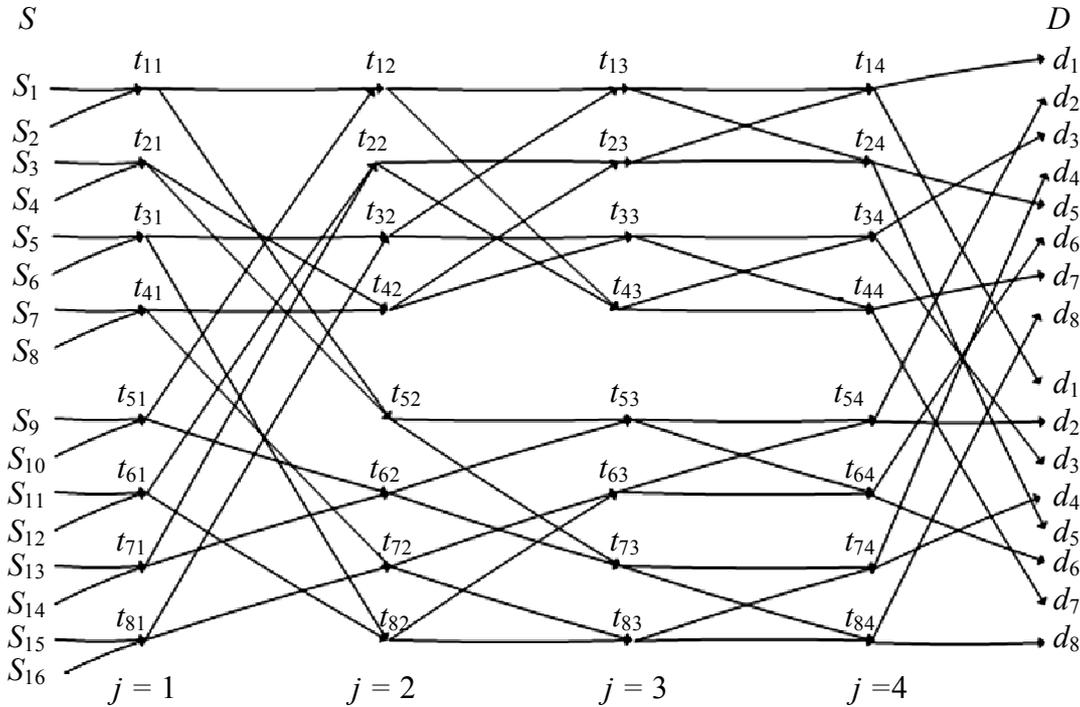


Рис. 1. Диаграмма орграфа матрицы кросс-кластерного транспозиционного преобразователя

Транспозиционные элементы всех уровней разбиты на подмножества, номер подмножества  $d$  определяется выражением

$$d = \operatorname{int}\left(\frac{i+2^{k-m-1}-1}{2^{k-m-1}}\right).$$

Учитывая условие (1), вершины каждого подмножества уровня  $m$  являются смежными вершинам из двух различных подмножеств уровня  $m+1$ , которые далее будем называть верхним и нижним подмножествами.

Отношение смежности вершин  $d_i$  и  $t_{ik}$  можно задать в виде таблицы, состоящей из пар строк.

**Отношение смежности вершин  $d_i$  и  $t_{ik}$**

Номер строки	Индексы смежных вершин $d_i$ и $t_{ik}$ орграфа $G(S, D, T, \check{A})$
2	$(1,2) = (d_1, d_2)$
4	$(1,2) = (i_1^1, i_2^1)$
	$(1,2,3,4) = (d_1, d_2, d_3, d_4)$
8	$(1,3,2,4) = (i_1^2, i_2^2, i_3^2, i_4^2)$
	$(1,2,3,4,5,6,7,8) = (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8)$
16	$(1,5,3,7,2,6,4,8) = (i_1^3, i_2^3, i_3^3, i_4^3, i_5^3, i_6^3, i_7^3, i_8^3)$
	$(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16) = (d_1, d_2, \dots, d_{16})$
32	$(1,9,5,13,3,11,7,15,2,10,6,14,4,12,8,16) = (i_1^4, i_2^4, \dots, i_{16}^4)$
	...
$N$	$(1,2, \dots, n) = (d_1, d_2, \dots, d_n)$
	$(2i_1^{k-1} - 1, 2i_2^{k-1} - 1, \dots, 2i_{n/2}^{k-1} - 1, 2i_1^{k-1}, 2i_2^{k-1}, \dots, 2i_{n/2}^{k-1}) = (i_1^k, i_2^k, \dots, i_n^k)$

Для каждого значения  $n$  в первом столбце располагаются в порядке возрастания индексы вершин  $d_i$ . Во втором столбце – индексы смежных вершин  $t_{jk}$   $k$ -го уровня. Индексы во второй строке вычисляются по рекуррентным формулам. Смежные вершины задаются парами  $(d_1, t_{i_1^k})$ ,  $(d_2, t_{i_2^k})$ , ...,  $(d_n, t_{i_n^k})$ . Отношение смежности вершин  $d_i$  и  $t_{ik}$ , можно задать, не используя рекуррентные соотношения.

Рассмотрим операторы преобразования индексов

$$\begin{aligned} f \cdot i &\equiv 2i - 1, \\ g \cdot i &\equiv 2i, \end{aligned}$$

причем для простоты записи будем считать, что если операнд справа от оператора отсутствует, то он равен 1:

$$\begin{aligned} f &\equiv f \cdot 1, \\ g &\equiv g \cdot 1. \end{aligned}$$

Тогда индексы смежных вершин  $t_{jk}$   $k$ -го уровня, расположенные во втором столбце таблицы, для случая  $n = 8$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} i_1^3 &= fff = 1; i_2^3 = ffg = 5; i_3^3 = fgf = 3; i_4^3 = fgg = 7, \\ i_5^3 &= gff = 2; i_6^3 = gfg = 6; i_7^3 = ggf = 4; i_8^3 = ggg = 8. \end{aligned}$$

Пусть, в общем случае,  $a_{k-1}, \dots, a_1, a_0$  – представление индекса  $r \leq n$  в двоичном виде, тогда  $i_r^k = \xi_{k-1} \dots \xi_1 \xi_0$ , где

$$\xi_i = \begin{cases} f, & \text{если } a_i=0, \\ g, & \text{если } a_i=1. \end{cases}$$

Рассмотрим способы преобразования формата исходной строки, связанной с вершинами  $S$  орграфа.

Пусть  $r_{ij} = \bigcup_{l=1}^k \tilde{A}_l$  – простой путь от  $s_i$  к  $d_j$ . Рассмотрим множество путей  $r_{ij}$  из  $S$  в  $D$ , не имеющих общих дуг

$$R := \{r_{ij} \mid \forall r_{ij} \neq r_{kl} \Rightarrow r_{ij} \cap r_{kl} = \emptyset\}, \\ |R| = n.$$

Значение  $R$  определяет биективное отображение  $T_{FD}: S \rightarrow D$ .

Пусть  $C_1, C_2$  – разбиение вершин  $D$ , причем  $C_1 = (d_0, d_1, d_2, \dots, d_{p-1})$ ,  $C_2 = (d_p, d_{p+1}, d_{p+2}, \dots, d_{n-1})$ ,  $C_2 = (d_p, d_{p+1}, d_{p+2}, \dots, d_{n-1})$ . Таким образом,  $|C_1| = p$ ,  $|C_2| = n - p$ .

Пометим произвольные  $p$  вершин множества  $S$ . Для всех помеченных вершин  $s_i$  существуют  $p$  различных путей  $r_{ij} \in R$  таких, что  $d_j \in C_1$ . Для формирования данных путей при переходе между уровнями орграфа  $G(S, D, T, \tilde{A})$  будем выбирать дуги так, чтобы  $l/2$  вершин подмножества уровня  $m$  соединялась с промежуточными вершинами верхнего подмножества уровня  $m + 1$ , а оставшиеся  $l/2$  вершин подмножества уровня  $m$  соединялись с промежуточными вершинами нижнего подмножества уровня  $m + 1$ , где  $l$  – мощность подмножества уровня  $m$ . Если  $l$  нечетное,  $(l+1)/2$  вершин подмножества уровня  $m$  соединяются с промежуточными вершинами верхнего подмножества уровня  $m + 1$ , а оставшиеся  $(l-1)/2$  вершин подмножества уровня  $m$  соединяются с промежуточными вершинами нижнего подмножества уровня  $m + 1$ .

Такой выбор всегда можно осуществить, причем выбор участка пути одной из вершин каждого верхнего или нижнего промежуточного подмножества уровня  $m$  можно сделать произвольно. Таким образом, в рамках предложенной комбинаторной модели возможно осуществление любой кросс-кластерной перестановки исходной строки данных длиной  $n$  между кластерами длиной  $p$  и  $n - p$ .

### *Аппаратная модель однотактного кросс-кластерного преобразователя*

Блок-схема однотактного кросс-кластерного преобразователя для  $n = 8$  представлена на рис. 2.

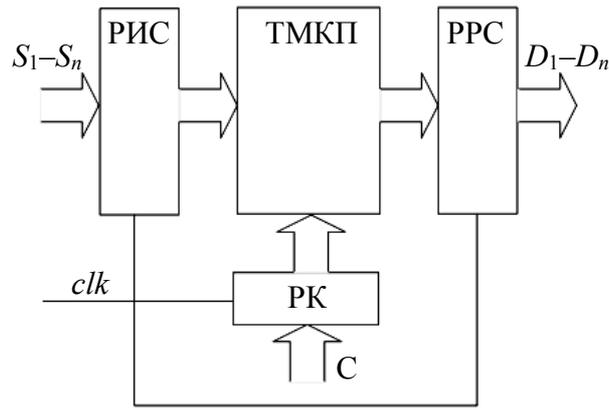


Рис. 2. Блок-схема кросс-кластерного транспозиционного преобразователя

Преобразователь состоит из транспозиционной матрицы кросс-кластерного преобразования (ТМКП) входного регистра исходной строки (РИС) и выходного регистра результирующей строки (РРС), а также регистра управляющих кодов РК. Схема ТМКП представлена на рис. 3.

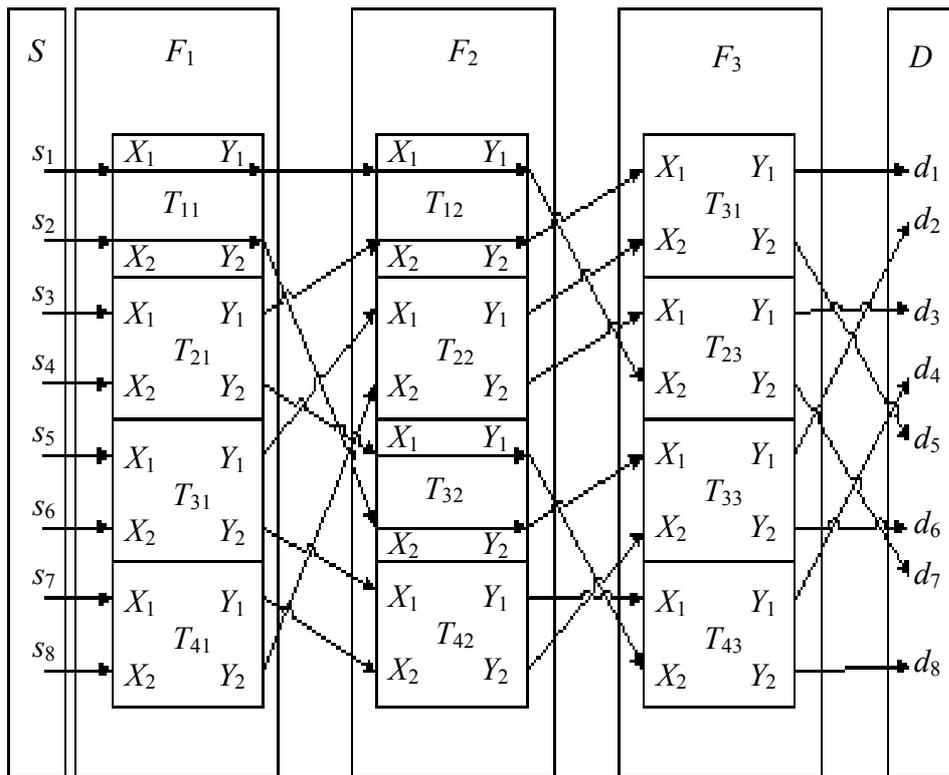


Рис. 3. Схема транспозиционной матрицы кросс-кластерного преобразования

Матрица состоит из логических транспозиционных элементов  $T_{ij}$ , имеющих два входа  $X_1, X_2$  и два выхода  $Y_1, Y_2$ , а также битовый вход управляющего кода  $COD$  (на рис. 2 для простоты не указан). Каждый логический элемент осуществляет транспозицию данных  $Y_1=X_2, Y_2=X_1$  при высоком ло-

гическом уровне на входе  $COD$  или передает данные без изменения  $Y_1=X_1$ ,  $Y_2=X_2$  при низком логическом уровне на входе  $COD$ . Таким образом, каждый логический элемент представляет собой  $2 \times 2$  баньян-переключатель (*Banyan switch*):

$$Y_1 = \overline{COD} \cdot X_1 + COD \cdot X_2,$$

$$Y_2 = COD \cdot X_1 + \overline{COD} \cdot X_2.$$

Элементы  $T_{11}, T_{12}, T_{32}$  не управляемые, их можно исключить из схемы. Входы кодов ТМКП соединены с выходами РК. Соединения между элементами  $T_{ij}$ , а также соединения  $T_{ij}$  с регистрами исходной  $s$  и результирующей  $D$  строками определяются отношением смежности соответствующих вершин графа  $G(S, D, T, \check{A})$ .

Моделирование преобразователя проводилось на уровне *RTL* (*register-transfer level*) с использованием языка *SystemC* [26–28]. Перед началом преобразования по переднему фронту тактового импульса  $clk$  в регистр управляющих кодов записываются управляющие коды дескриптора  $FD_n$ , в регистр исходной строки данных  $s$  –  $n$  битов форматируемых данных, в регистр результирующей строки  $PPC$  – форматированная на предыдущем шаге строка данных.

Каждый бит управляющих кодов, записанный в РК, подается на вход  $COD$  одного из транспозиционных элементов ТМКП. По переднему фронту следующего тактового импульса перестановленные элементы данных записываются в выходной регистр данных. Одновременно в РК заносятся новые коды дескриптора  $FD_n$ , а в  $PC$  –  $n$  следующих элементов данных.

Если в каждом из логических элементов реализовать обратную функцию преобразования

$$X_1 = \overline{COD} \cdot Y_1 + COD \cdot Y_2,$$

$$X_2 = COD \cdot Y_1 + \overline{COD} \cdot Y_2,$$

то ТМКП выполняет обратное преобразование. Следовательно, для осуществления прямого и обратного кросс-кластерного преобразования данных эффективно использовать матрицы прямого и обратного преобразований. В этом случае дескриптор прямого преобразования бинарной строки также будет дескриптором обратного преобразования бинарной строки.

Предложенное устройство дает возможность осуществления любого кросс-кластерного преобразования исходной строки данных длиной  $n$  элементов между двумя произвольно выбранными кластерами. Кросс-кластерная перестановка элементов входных данных осуществляется параллельно за один такт внешнего генератора тактовых импульсов, что обеспечивает высокую скорость преобразования. Время задержки преобразования  $\tau \cdot \log_2 n$ , где  $\tau$  – задержка на одном транспозиционном элементе.

Число управляемых логических элементов транспозиционной матрицы составляет  $\frac{n}{2}(\log_2(n) - 1) + 1$  и растет практически линейно с ростом  $n$ , что делает технически возможным кросс-кластерную перестановку больших блоков данных.

Число различных кросс-кластерных перестановок, осуществляемых данным устройством,  $\frac{n!}{(p)!(n-p)!}$ . Максимальное число различных кросс-кластерных перестановок достигается при  $p = \frac{n}{2}$ .

Композиция ТМКП для перестановки  $n$  элементов входных данных с двумя ТМКП для перестановки  $n/2$  элементов входных данных позволяет осуществить любую перестановку между четырьмя кластерами. При этом входы матрицы преобразования  $n/2$  элементов соединяются с выходами матрицы преобразования  $n$  элементов. Использование различных вариантов последовательного включения ТМКП дает возможность реализовать любую перестановку между кластерами  $C_i$  с размерами  $|C_i| = 2^m$ , где  $m = \overline{(1, k-1)}$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молдовян Н. А., Молдовян А. А., Алексеев Л. Е. Молдовян Н. А., Молдовян А. А., Алексеев Л. Е. Перспективы разработки скоростных шифров на основе управляемых перестановок // Вопросы защиты информации. 1999. № 1. С. 41–47.
2. Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. Аппаратный акселератор сервера форматирования данных // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. Пенза, 2007. Т. 1. С. 134–136.
3. 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 Сарат. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2008139529/09 ; заявл. 07.10.2008 ; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 1. – 8 с.
4. Пат. 2488161 Российская Федерация, МПК G0 6F 11/00. Устройство перестановок и сдвигов битов данных в микропроцессорах / заявитель Сотов Л. С. ; патентообладатель Сарат. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2011145864/08 ; заявл. 14.11.2011 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 27 с.
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. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 66–72.
6. Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. Математические модели стохастического формирования изоморфных представлений структурных элементов данных в ЭВМ // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 29–41.
7. 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.

8. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С.* Стохастические генераторы упорядоченных разбиений конечных множеств с быстрым ростом энтропии // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 57–72.
9. *Сотов Л. С.* Комбинаторная модель функционального формирователя разбиений бинарного множества // Информационные технологии. 2010. № 10. С. 46–52.
10. *Соболев С. С., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Алгоритм работы и модель функционального генератора перестановок // Информационные технологии. 2010. № 4. С. 41–46.
11. *Ляшенко А. В., Сотов Л. С.* Простой матричный формирователь  $r$ -выборок // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2010. Вып. 8 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 47–56.
12. *Сотов Л. С.* Аппаратные устройства формирования прямых и обратных перестановок данных // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2011. Вып. 9 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 61–77.
13. *Сотов Л. С.* Об эффективности использования специальных команд преобразования форматов данных в вычислительной технике // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2011. Вып. 10 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 61–80.
14. *Сотов Л. С., Ачкасов В. Н.* Универсальный модуль манипуляции битами данных в микропроцессорах // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2011. Вып. 11 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 57–73.
15. *Назаров С. И., Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Хвалин А. Л.* Проектирование микропроцессора с расширенным набором команд манипуляции битами данных на базе архитектуры OPENRISC1200 // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 17. С. 50–65.
16. *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 Сарат. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 51–63.
17. *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.
18. 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 Сарат. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2008132009/09 ; заявл. 06.08.2008 ; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14. – 8 с.
19. *Сотов Л. С.* Методы синтеза устройств, выполняющих инструкции перестановки битов данных // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2011. Вып. 10 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 25–50.
20. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* О формировании доверенной среды серверных систем у правления базами данных // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2008. № 3. С. 23–27.
21. *Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н.* Аппаратный акселератор сервера форматирования данных // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. Пенза, 2007. Т. 1. С. 134–136.

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

23. Молодченко Ж. А., 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 нанoeлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 11–23.

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

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

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

28. 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 нанoeлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты. С. 60–66.

УДК 621.391.037

## **МИКРОПРОЦЕССОР С УСКОРЕННОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ БИТАМИ ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

**А. В. Ляшенко, Л. С. Сотов\*, А. Л. Хвалин\*, В. С. Чесаков\***

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

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

Представлены результаты исследований, возможности и перспективы использования специальных инструкций преобразования форматов данных для решения задач в системах радиокommunikаций. Проведенные исследования свидетельствуют об ускорении выполнения алгоритмов кодирования в среднем более чем в два раза.

*Ключевые слова:* RISC-микروпроцессор, инструкция перестановок, инструкции группирования и размещения битов, многоуровневая коммутационная сеть, генератор случайных перестановок, распределение вероятностей.

### **Microprocessor with Advanced Bit Manipulation for Digital Signal Processing in Communication Systems**

**A. V. Lyashenko, L. S. Sotov, A. L. Khvalin, V. S. Chesakov**

Results of researches, opportunities and prospects of use of special instructions of transformation of formats of the tasks given for the decision in the system of radio of communications are presented. The presented results testify to acceleration of execution of algorithms of coding on average more than twice.

*Key words:* microprocessor, permutation instruction, subword extract instruction, subword deposit instruction, multistage interconnection network, random permutation generator, probability distribution.

В системах радиокommunikаций параметры физических сигналов изменяются в соответствии с передаваемой информацией. В общем случае можно выделить следующие шаги преобразований:

- кодирование со сжатием входных данных для сокращения их объема;
- шифрование для обеспечения конфиденциальности;
- вставка дополнительных битов для обеспечения коррекции ошибок;
- рандомизация для исключения длинных строк с битами, имеющими только высокий или только низкий уровень;
- модуляция (канальное кодирование) для записи информации на несущий сигнал для передачи по каналу связи.

Для реализации этих шагов обычно используются специальные, ориентированные на приложение системы на кристалле (*ASIC*). Однако при этом теряется гибкость использования аппаратурных средств. С целью обеспечения гибкости используется комбинация программных и аппаратурных решений для выполнения указанных выше шагов обработки. Преимуществами такого подхода являются:

- возрастание числа приложений, в которых может использоваться разработанный процессор;
- адаптивное кодирование для регулирования амплитуд спектральных составляющих в зависимости от частоты;
- возможность модернизации системы без изменения аппаратурных компонентов;
- более быстрое совершенствование системы связи.

Для эффективности решения поставленных задач процессор в системе связи должен наряду с обычными инструкциями, характерными для процессоров общего применения, выполнять дополнительные инструкции [1]. Наиболее важными здесь являются инструкции манипуляции битами данных [2].

С математической точки зрения речь идет о решении проблемы формирования изоморфных представлений или преобразования форматов данных, представленных в виде двоичных наборов. В контексте булевой алгебры двоичный набор объединяет в упорядоченном виде нулевые и единичные значения некоторого множества булевых переменных. Если считать, что  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  – это набор, состоящий из всех элементов двоичного множества  $\{x_1, x_2 \dots x_n\}$ , то при замене переменных на их значения образуется двоичный набор [3]. В общем случае он может рассматриваться как слово в алфавите  $\{0,1\}$ . Формат данных представляется в виде набора переменных, очередность следования которых предопределяет значения этих переменных в соответствующем двоичном наборе. Процедура формирования изоморфных представлений данных в вычислительной технике может рассматриваться как выполнение преобразований перестановки (подстановки) бинарных наборов данных.

С технической точки зрения битовые перестановки сложны для программной реализации, так как обычные микропроцессоры работают с машинными словами.

В работе [3] 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 [4], но при разработке устройств, выполняющих перестановки параллельно, проблемой является достаточно высокая аппаратурная сложность блока декодирования битов управления переключателями [5, 6]. Аналогичная проблема возникает и при других подходах к разработке устройства, основанных, например, на использовании многоуровневой коммутационной сети *butterfly*. При этом для построения универсального модуля манипуляции битами требуется две сети *butterfly* и *ibutterfly*, реализующие прямые и обратные преобразования. В работах [7–10] предпринят ряд шагов по упрощению и повышению быстродействия устройств, осуществляющих манипуляции битами данных, а в работе [11] описана практическая реализация универсального устройства манипуляции битами данных.

В данной статье передается опыт работы авторов по созданию синтезируемых процессорных систем для защищенных систем коммуникаций, в том числе с кодовым разделением каналов связи. В качестве среды разработки и моделирования использовалась программа *Xilinx ISE*. В качестве нового выполняющего функции манипуляции битами данных процессора взято универсальное устройство, описанное в [11–14]. Особенности работы отдельных модулей системы подробно обсуждены в [15, 16].

Для тестирования устройства перестановки битов по его описанию, приведенному в [12–14], была составлена имитационная модель на языках *Verilog* и *SystemC* [17, 18].

Рассмотрим задачи, типичные для систем радиокommunikационных систем.

Блок-схема системы *RPMA* (*Random Permutation-Based Multiple Access*) представлена на [19]. Информация от абонентов  $Z^1$ – $Z^k$  преобразует-

ся с использованием последовательностей случайных перестановок  $B^1-B^k$ . Процедура случайной перестановки данных приводит к расширению спектра информационного сигнала. На приемной стороне осуществляются обратные преобразования и выделяется сигнал от требуемого абонента. Диаграмма, иллюстрирующая процедуру обработки блока данных в системах *RPMA*, представлена на рис. 1.

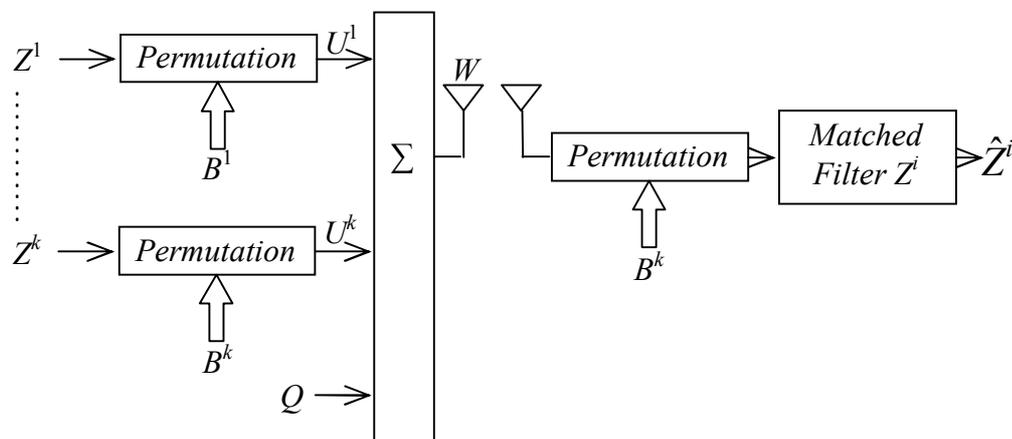


Рис. 1. Блок-схема организации системы *RPMA*

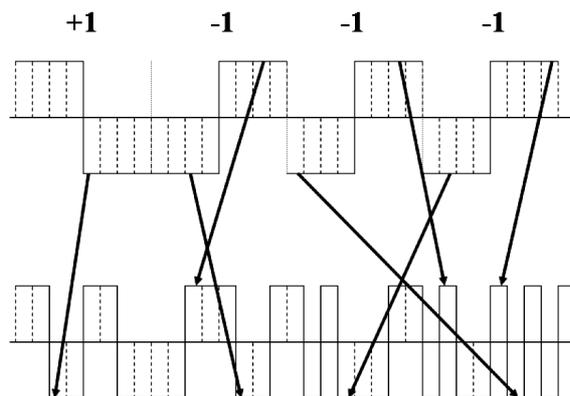


Рис. 1. Процедура обработки данных для использования в системах *RPMA*

Для осуществления процедуры случайной перестановки в системе *RPMA* требуются устройства для осуществления прямых и обратных перестановок битов данных и генератор случайных перестановок [20, 21], в состав которого входит генератор случайных чисел [22, 23] с контролем режима функционирования [24, 25]. Для ускорения процедуры перестановок могут использоваться различные подходы [7, 9], в том числе с использованием переключательных матриц, предложенных в работах [26, 8].

Использование для обработки информационного сигнала процессора, поддерживающего команды преобразования форматов данных, приводит к существенному снижению количества инструкций, выполняемых в единицу времени. Таким образом снижается нагрузка на процессор и энергопотребление [27].

Часто перед передачей двоичные данные преобразуются в текстовый формат. Примером может служить метод *UUE (Uuencode)*. Это метод представления двоичных данных в текстовой форме, пригодной для передачи через средства, предназначенные только для передачи текстов (например, через *e-mail, FTN, NNTP*) (транспортное кодирование).

*UUE*-данные начинаются со строки «*begin mode file*», где константа *mode* определяет права доступа к файлу в операционной системе *Unix* в восьмеричной системе счисления (для *DOS/Windows* приложений это число всегда 644), а *file* – имя исходного файла. При кодировании из файла берутся данные по три байта (в случае, если осталось меньше 3 байтов, недостающие заменяются нулями). Биты, образующие эти три байта, делятся на четыре группы по 6 битов. Каждая шестибитная группа интерпретируется как число (от 0 до  $2^6 - 1 = 63$ ), к которому добавляется 32. Получившееся число в диапазоне от 32 до 95 трактуется как код символа в *ASCII* таблице (получаются символы от пробела (32) до знака подчеркивания (95)). Могут использоваться и другие символы *ASCII*, однако значение имеют только младшие шесть битов кода символа. В силу свойств кодировки *ASCII* изменение регистра символа не меняет его младшие шесть битов.

Каждая группа из 60 символов (соответствует 45 байтам исходного файла) используется для создания отдельной строки. В начале строки указывается количество закодированных символов в строке (во всех строках кроме последней это число 45, то есть символ 'M'). Каждая строка завершается символом перевода строки (*\n* или *\n\r* в зависимости от платформы).

После окончания данных кодируемого файла помещается строка, содержащая единственный пробел (и перевод строки), и строка с текстом «*end*». Описанная процедура иллюстрируется на рис. 3.

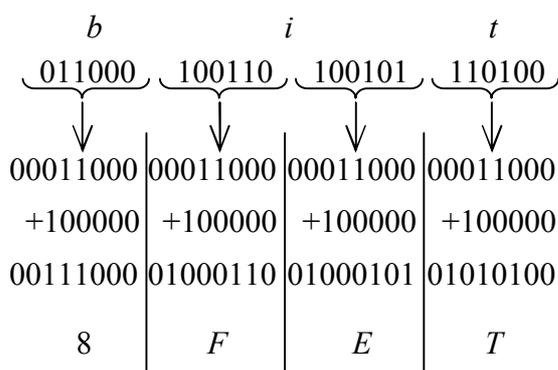


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая процедуру *UUE*

Как показано в [12, 7], при использовании набора стандартных инструкций *and, shift, or* для выполнения преобразования, приведенного на рис 3, потребуется выполнение  $4 \cdot 4 - 1 = 15$  инструкций. Аналогичная операция может быть реализована с использованием одной инструкции *bsn*, соответственно производительность микропроцессора возрастает в пятнадцать раз [26, 14].

Перед передачей по каналам связи данные часто подвергаются «упаковке» с соответствующей «распаковкой» на приемной стороне. В задаче упаковки данных осуществляется процедура извлечения части битов из слова данных с последующим размещением выделенных битов в определенном месте нового машинного слова. Диаграмма, иллюстрирующая процедуру упаковки бинарного изображения, представлена на рис. 2. Эта процедура реализуется, например, в стандартной функции *bwpack*, используемой в пакете программы *MATHLAB*. Для решения задачи с использованием набора инструкций *and*, *shift*, *or* необходимо выполнить восемь операций, включающих данный набор и формирование маски для выделения соответствующего бита. В одной из серий инструкций операция *shift* может быть исключена. Таким образом, для выполнения упаковки потребуется выполнение  $8 \cdot 4 - 1 = 23$  инструкций, которые могут быть заменены одной инструкцией *grp*. Ускорение упаковки машинного слова составит 23 раза.

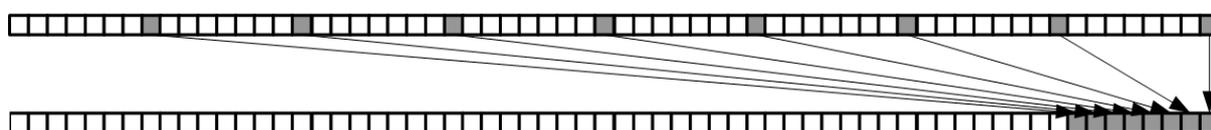


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая процедуру упаковки битов бинарного изображения

Необходимо заметить, что аналогичные результаты можно получить с использованием *SSE* инструкции *pmovmskb* [1]. Но использование инструкции *grp* обладает гораздо большей гибкостью и ее применение возможно при обработке данных, организованных в подслова, длина которых отличается от 8 или 16 битов [2].

В системах телекоммуникаций часто используются криптографические преобразования. Перестановки являются одним из основных примитивов, используемых в криптографических шифрах. Перестановки обеспечивают статистическое рассеяние избыточности представления информации. Многие популярные шифры, такие как *DES*, включают примитивы преобразований перестановки, при этом аппаратная поддержка данных преобразований обеспечивает существенное увеличение производительности устройств, выполняющих криптографические преобразования. На основе управляемых перестановок разработаны новые скоростные шифры. Отсутствие инструкций произвольных манипуляций битами в общепринятых наборах команд в несколько раз увеличивает время выполнения криптографических алгоритмов, причем задачи защиты информации, как правило, решаются универсальным процессором вычислительной системы [28, 29].

Все рассмотренные выше задачи преобразования сигналов в телекоммуникационных системах решаются на базе единого подхода с использованием разработанного авторами процессора *OP-БМ* с ускоренной манипуляцией битами данных [27].

Микропроцессор *OP-БМ* был реализован с использованием открытых решений процессора *OPENRISC* и успешно протестирован на базе ПЛИС

*SPARTAN-6* фирмы *Xilinx*. Ниже приведены основные характеристики разработанной тестовой платы с микропроцессором *OP-БМ*:

- 1) *RISC*-ядро с системой команд *ORFPX32*;
- 2) уникальный блок улучшенной манипуляции битами данных, увеличивающий производительность процессора от 2 до 10 раз, для широкого класса задач;
- 3) встроенные криптографические и *DSP*-функции;
- 4) разрядность процессора – 32;
- 5) пятиступенчатый конвейер;
- 6) встроенный 32-разрядный блок арифметики с плавающей запятой, соответствующий *IEEE 754*;
- 7) встроенный двухканальный контроллер памяти *DDR2/DDR3*;
- 8) встроенный аппаратный генератор случайных чисел с программируемой функцией распределения вероятностей и контролем режима функционирования;
- 9) общецелевой параллельный порт, интерфейсы *UART*, *PS2* и контроллер *Ethernet*;
- 10) операционные системы *Linux*, *RTEMS*, *FreeRTOS*, *eCos*;
- 11) интерфейс *HDMI* для подключения платы к монитору;
- 12) кодек *AC-97*;
- 13) встроенный формирователь случайных и псевдослучайных чисел с программируемой функцией распределения;
- 14) постоянное запоминающее устройство объемом 16 МБ × 4 на базе *SPI Flash* для конфигурирования и хранения данных;
- 15) программируемый интерфейс для параллельного ввода–вывода информации.

Процессор имеет унифицированную кодировку системы команд, код размещается побитно в одном машинном слове, причем для отдельной команды может быть предусмотрена своя дополнительная идентификация разрядов. Для обеспечения обработки новых команд манипуляции битами данных изменения в первую очередь коснулись модуля центрального процессорного устройства (ЦПУ).

Для обеспечения необходимой производительности при малом, менее 1 Вт, энергопотреблении использован разработанный на базе специальной многоуровневой коммутационной сети новый модуль улучшенной манипуляции битами данных [27]. Используя разработанный модуль, можно осуществить любую битовую перестановку путем выполнения двух одинаковых инструкций, а также инструкций извлечения, размещения, циклического и логического сдвигов групп битов машинного слова.

Для генерации случайных последовательностей и осуществления случайных перестановок процессор имеет встроенный формирователь случайных и псевдослучайных чисел с программируемой функцией распределения и контролем режимов функционирования и системных сбоев [24, 25]. Формирователь описывается простым двумерным дискретным отображением с хаотической динамикой, что позволило строго обосновать его декларируемые свойства.

С использованием формирователя случайных и псевдослучайных чисел и матрицы для осуществления перестановок процессор за один такт тактового генератора обеспечивает формирование случайных и псевдослучайных перестановок [30].

Таким образом, в статье представлены результаты исследований, возможности и перспективы использования специальных инструкций преобразования форматов данных для решения задач в системах радиокommunikаций. Показано, что новые команды манипуляции битами данных обеспечивают ускорение выполнения алгоритмов обработки информации в среднем более чем в два раза. Использование специальных инструкций наиболее эффективно в программах, включающих многократно выполняемые преобразования форматов данных. При этом ускорение выполнения некоторых алгоритмов может составлять один, два порядка, например, сортировка больших наборов данных или формирование ключей шифра *DES*.

Для обработки сигналов в системах радиокommunikаций предложен микропроцессор с ускоренной манипуляцией битами данных. Новые команды микропроцессора позволяют увеличить его производительность и сократить энергопотребление от 2 до 10 раз при решении задач, типичных для радиокommunikационных систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hilewitz Y., Lee R. B.* Fast Bit Gather, Bit Scatter and Bit Permutation Instructions for Commodity Microprocessors // *J. of Signal Processing Systems*. Springer New York, 2008. Vol. 53, № 1–2. P. 145–169.

2. *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.

3. *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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. *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.

8. *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.

9. *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.

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

11. Пат. 2488161 Российская Федерация, МПК G0 6F 11/00. Устройство перестановок и сдвигов битов данных в микропроцессорах / заявитель Сотов Л. С. ; патентообладатель Сарат. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – № 2011145864/08 ; заявл. 14.11.2011 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 27 с.

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

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

14. *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 Сарат. ун-та, 2008. Вып. 4 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. Устройства различного назначения. С. 11–23.

15. *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 Сарат. ун-та, 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 60–66.

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

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

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

19. *Coulon M., Roviras D.* Multi-user adaptive receivers for a multiple-access system based on random permutations on time-varying frequency-selective channels with unknown delays and coefficients // IET Communications. 2012. Vol. 6, № 11. P. 1562–1572.

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

21. Пат. 2340931 Российская Федерация, МПК G06F 7/58, H03K 3/84. Генератор случайных чисел / заявители Молодченко Ж. А., Сотов Л. С., Харин В. Н. ; патентообладатель Сарат. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – 2007111405/09 ; заявл. 28.03.2007 ; 10.12.2008, Бюл. № 34. – 5 с.

22. *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.

23. *Сотов Л. С., Харин В. Н.* Использование генераторов динамического хаоса в системах информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2009. № 2. С. 32–37.

24. *Сотов Л. С., Харин В. Н., Хвалин А. Л.* Встроенные средства контроля генераторов случайных сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 7. С. 30–33.

25. *Сотов Л. С., Харин В. Н., Хвалин А. Л.* Детекторы режимов функционирования генераторов случайных сигналов // Автоматика и телемеханика. 2010. № 5. С. 166–170.

26. *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.

27. *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.

28. *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.

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

30. *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.

УДК 531.38

**БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ  
ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**  
(гармонический способ автономной ориентации)

**Г. М. Проскуряков, А. А. Игнатьев\*, А. А. Маслов\***

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

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

Разработан *гармонический способ* решения задачи автономной ориентации для вращающихся подвижных объектов (наземных и подземных, подводных и надводных, воздушных и комбинированных, баллистических и космических аппаратов) на основе обработки магнито-инерциальной информации, получаемой от трехосных блоков век-

торных датчиков (акселерометров, магнитометров, гироскопов). Приведены алгоритмы обработки комплексной информации для гармонического способа, а также даны оценки условий их практической реализации в бесплатформенной геофизической системе ориентации.

*Ключевые слова:* вращающийся подвижный объект, бесплатформенная система ориентации, трехосные блоки акселерометров, магнитометров, гироскопов, алгоритм, матрица, гармоническая функция.

**Strapdown Orientation System  
of Moving Rotating Objects**  
(harmonic method for the autonomous orientation)

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

*Harmonious method* for solving the problem of autonomous orientation for rotating movable objects is designed (surface and underground, underwater and surface, air and combined, ballistic and space vehicles) it is based on the processing of the magneto-inertial information from the triaxial block of vector sensors (accelerometers, magnetometers, gyros). Algorithms for processing of complex information for a harmonic way are shown, as well as data evaluation conditions of their implementation in the geophysical strapdown orientation system.

*Key words:* rotating a movable object, strapdown orientation system, a three-axis accelerometer unit, magnetometers, gyroscopes, the algorithm, matrix, harmonic function.

Для управления и стабилизации вращающихся подвижных объектов могут быть использованы следующие системы ориентации: гироскопические (ГСО), бесплатформенные инерциальные (БИСО) или бесплатформенные геофизические (БГСО) [1–10].

**БГСО** строятся на основе комплексирования датчиков магнито-инерциальной информации: трехосных блоков магнитометров (ТБМ), акселерометров (ТБА) и гироскопов (ТБГ). БГСО выполняются как малогабаритные и даже миниатюрные измерительно-вычислительные системы, использующие различное программно-алгоритмическое обеспечение [3–7]. Однако этим БГСО присущи недостатки, связанные с несовершенством как конструкций и схемотехнических решений по построению измерительной части системы, так и алгоритмов ее функционирования.

Указанные недостатки частично устраняются в способе ориентации, описанном в патенте [8], в котором предлагается алгоритмическое определение угла крена  $\gamma$  вращающегося подвижного объекта (ВПО) на основе обработки магнитометрической информации от ТБМ с учетом задаваемых значений углов магнитного курса  $\Phi$ , тангажа  $\vartheta$  и магнитного наклона  $I_m$ .

Эти недостатки обусловлены использованием очень грубых алгоритмов аналитического горизонтирования (АГ), не учитывающих проявление перекрестной геометрико-кинематической связи канала крена с каналом тангажа, влияние геометрических технологических погрешностей сборки и монтажа ТБА, а также алгоритмов аналитического компасирования (АК) (без учета магнитных свойств основания и геометрических технологических погрешностей сборки и монтажа ТБМ).

При разработке алгоритмов аналитического кренуказания ВПО использовано явление модуляции показаний поперечных магнитометров ( $Y$ - и

Z-магнитометров) с помощью вращения объекта, за счет чего в их сигналах содержится информация о гармонических функциях ( $\sin(\tilde{\gamma})$ ,  $\cos(\tilde{\gamma})$ ) приближенного значения угла крена  $\tilde{\gamma}$ . Однако вычисление гармонических функций ( $\sin(\gamma)$ ,  $\cos(\gamma)$ ) от точного значения угла крена ( $\gamma = \tilde{\gamma} + \Delta\gamma$ ) предполагает предварительную оценку поправки  $\Delta\gamma$ . В источнике [8] эту оценку производят по алгоритму вычисления функции  $\text{tg}(\Delta\gamma)$  с учетом выбора численных значений функций чувствительностей погрешностей  $\delta\gamma$  к ошибкам неточного задания углов курса ( $\Delta\Phi$ ) и тангажа ( $\Delta\vartheta$ ).

Практическая реализация разработанных алгоритмов накладывает сильные ограничения на выбор траектории полета и маневрирование ВПО (по углам  $\psi$ ,  $\vartheta$ ,  $J_m$ ) и становится невозможной при фактических условиях эксплуатации для большинства баллистических траекторий ВПО.

Для исключения недостатков, характерных для магнитометрической системы аналитического кренуказания ( $\tilde{\gamma}$ ) ВПО, в работах [3, 4] предложена малогабаритная магнитоакселерометрическая система ориентации (МАСО) с программным кардановым подвесом, предназначенная для определения всех углов ( $\Phi$ ,  $\vartheta$ ,  $\gamma$ ) ориентации ВПО в пространстве. В состав такой малогабаритной микропроцессорной измерительно-вычислительной системы (ИВС) входят однокомпонентный (НМС 1001) и двухкомпонентный (НМС 1002) магниторезистивные датчики производства фирмы *Honeywell* (США) [11] и два акселерометра АТ 1104 отечественного производства (ОАО «Темп-Авиа», г. Арзамас) [12], а также аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа *AD 73360* производства фирмы *Analog Devices* (США), микроконтроллер *ATmega*, энергонезависимая память типа *AT24C*, блоки питания и электронные блоки преобразования напряжения. Работоспособность макета МАСО для ВПО при произвольной ориентации объекта в пространстве ( $0 \leq \psi \leq 360^\circ$ ,  $-90^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$ ) не может быть подтверждена полностью в силу проявления принципиальных ограничений и недостатков, присущих принятым алгоритмам аналитического горизонт-компасирования (АГК).

В основу предлагаемой концепции решения задачи автономной ориентации ВПО положено условие обработки комплексной геофизической информации о векторах напряженности  $T_{МПЗ}$  магнитного поля Земли (МПЗ), кажущегося ускорения  $a$  и угловой скорости вращения объекта  $\omega$ . При этом предполагается, что весь цикл работы БГСО складывается из двух этапов, определяющих два режима работы системы [10]:

- первый этап – режим начальной выставки;
- второй этап – режим автономной работы.

На первом этапе выполняется **начальная выставка** БГСО, т. е. определение начальных углов курса  $\psi_0$ , тангажа  $\vartheta_0$  и крена  $\gamma_0$  с использованием широко применяемых на практике алгоритмов аналитического горизонт-компасирования (АГК) по сигналам системы блоков ТБА+ТБГ [13, 14].

В режиме **автономной работы** ВПО и его БГСО производится принудительное раскручивание объекта до угловой скорости  $\omega_0$  вокруг продольной оси  $X$ , в результате чего реализуется один силовой (стабилизирующий) и три информационно-измерительных (хронометрический, модулирующий и гармонический) эффекта. Показания блоков ТБМ, ТБА и ТБГ в режиме автономной работы БГСО формируются в соответствии с проявлением хронометрического, модулирующего и гармонического эффектов вращения в виде компонент векторов  $\mathbf{T}_m$ ,  $\mathbf{a}_m$  и  $\boldsymbol{\omega}_m$  [10, 15].

Фазовые сдвиги колебаний сигналов поперечных магнитометров ( $\Delta\phi_m$ ) и гироскопов ( $\Delta\phi_g$ ), оси чувствительностей которых параллельны поперечным осям  $Y$  и  $Z$  связанного трехгранника, линейно связаны с интервальными отрезками времени  $\Delta t_m$ ,  $\Delta t_g$ , определяемыми хронометрическим способом [15].

Причем выходные сигналы магнитометров, акселерометров и гироскопов ( $\mathbf{u}_m$ ,  $\mathbf{u}_a$ ,  $\mathbf{u}_g$ ) оказываются зависимыми от проекций векторов  $\mathbf{T}_m$ ,  $\mathbf{a}_m$ ,  $\boldsymbol{\omega}_m$  на оси связанного трехгранника  $m = XYZ$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_m &= [u_{xm} \quad u_{ym} \quad u_{zm}]^T = k_m \cdot [T_x \quad T_y \quad T_z]^T + [\Delta u_{xm} \quad \Delta u_{ym} \quad \Delta u_{zm}]^T, \\ \mathbf{u}_a &= [u_{xa} \quad u_{ya} \quad u_{za}]^T = k_a \cdot [a_x \quad a_y \quad a_z]^T + [\Delta u_{xa} \quad \Delta u_{ya} \quad \Delta u_{za}]^T, \\ \mathbf{u}_g &= [u_{xg} \quad u_{yg} \quad u_{zg}]^T = k_g \cdot [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T + [\Delta u_{xg} \quad \Delta u_{yg} \quad \Delta u_{zg}]^T, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k_m$ ,  $k_a$ ,  $k_g$  – номинальные значения масштабных коэффициентов магнитометров, акселерометров и гироскопов;  $\Delta\mathbf{u}_m$ ,  $\Delta\mathbf{u}_a$ ,  $\Delta\mathbf{u}_g$  – векторы нулевых сигналов датчиков (смещений нулей);  $u_{xm}$ ,  $u_{ym}$ ,  $u_{zm}$ ,  $u_{xa}$ ,  $u_{ya}$ ,  $u_{za}$ ,  $u_{xg}$ ,  $u_{yg}$ ,  $u_{zg}$  – выходные сигналы ТБМ, ТБА и ТБГ соответственно;  $\Delta u_{xm}$ ,  $\Delta u_{ym}$ ,  $\Delta u_{zm}$ ,  $\Delta u_{xa}$ ,  $\Delta u_{ya}$ ,  $\Delta u_{za}$ ,  $\Delta u_{xg}$ ,  $\Delta u_{yg}$ ,  $\Delta u_{zg}$  – нулевые сигналы датчиков.

От недостатка хронометрического способа решения задачи автономной ориентации ВПО свободен **гармонический способ**, основанный на вычислении углов вращения  $\gamma$  и углов маневрирования объекта  $\psi$  и  $\vartheta$  по гармонически модулированным сигналам поперечных магнитометров, акселерометров и гироскопов. Анализ показывает, что амплитуды сигналов поперечных датчиков и их относительные фазовые сдвиги несут в своих значениях косвенную информацию как о частоте  $\nu_0$  и скорости вращения  $\omega_0$  ВПО, так и об углах ориентации связанного трехгранника  $m = XYZ$  в пространстве ( $\psi$ ,  $\vartheta$ ,  $\gamma$ ).

С учетом вращения ВПО вокруг продольной оси  $X$  с угловой скоростью  $\omega_0$  сигналы продольных датчиков, оси чувствительностей которых параллельны оси  $X$ , оказываются немодулированными, а сигналы поперечных датчиков, оси чувствительности которых параллельны поперечным осям  $Y$  и  $Z$  объекта, оказываются модулированными вращением объекта и гармонически изменяемыми с частотой  $\nu_0(\omega_0)$ :

$$\begin{aligned} u_{my} &= k_m \cdot T_y(\omega_0 t) + \Delta u_{my}, \quad u_{mz} = k_m \cdot T_z(\omega_0 t) + \Delta u_{mz}, \quad u_{ay} = k_a \cdot a_y(\omega_0 t) + \Delta u_{ay} \\ u_{az} &= k_a \cdot a_z(\omega_0 t) + \Delta u_{az}, \quad u_{gy} = k_g \cdot \omega_y(\omega_0 t) + \Delta u_{gy}, \\ u_{gz} &= k_g \cdot \omega_z(\omega_0 t) + \Delta u_{gz}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T_y(\omega_0 t)$ ,  $T_z(\omega_0 t)$ ,  $a_y(\omega_0 t)$ ,  $a_z(\omega_0 t)$ ,  $\omega_y(\omega_0 t)$ ,  $\omega_z(\omega_0 t)$  – входные сигналы поперечных  $Y$ - и  $Z$ -датчиков, модулированные по амплитуде за счет вращения объекта с угловой скоростью  $\omega_0$ .

С учетом модуляции сигналов поперечных датчиков вращением ВПО выражения (2) можно привести к гармонической форме:

$$\begin{aligned} u_{my} &= U_{my} \cdot \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \varphi_m) + \Delta u_{my}, & u_{mz} &= U_{mz} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_m) + \Delta u_{mz}, \\ u_{ay} &= U_{ay} \cdot \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \varphi_a) + \Delta u_{ay}, & u_{az} &= U_{az} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_a) + \Delta u_{az}, \\ u_{gy} &= U_{gy} \cdot \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \varphi_r) + \Delta u_{gy}, & u_{gz} &= U_{gz} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_r) + \Delta u_{gz}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_{my}$ ,  $U_{mz}$ ,  $U_{ay}$ ,  $U_{az}$ ,  $U_{gy}$ ,  $U_{gz}$ ,  $\varphi_m$ ,  $\varphi_a$ ,  $\varphi_r$  – амплитуды и фазы выходных сигналов поперечных датчиков.

С учетом предварительно проведенных метрологических калибровок блоков ТБА, ТБМ и ТБГ, обеспечивающих определение масштабных коэффициентов и смещений нулей всех датчиков, на основе результатов текущих измерений ( $\mathbf{u}_m$ ,  $\mathbf{u}_a$ ,  $\mathbf{u}_r$ ) и в соответствии с выражениями (1) можно вычислить входные сигналы всех датчиков:

$$T_i = \frac{u_{im} - \Delta u_{im}}{k_m}, \quad a_i = \frac{u_{ia} - \Delta u_{ia}}{k_a}, \quad \omega_i = \frac{u_{ir} - \Delta u_{ir}}{k_r}, \quad (4)$$

где  $i = x \forall y \forall z$ .

Приведем вычисленные по формулам (4) входные сигналы ТБМ, ТБА и ТБГ к немагнитному невращающемуся основанию, т. е. к резальной системе координат, с учетом результатов аналитической юстировки блоков ТБМ, ТБА и ТБГ ( $B_m$ ,  $B_a$ ,  $B_r$ ,  $M$ ), магнитной калибровки ТБМ ( $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}}$ ;  $S$ ) и идентификации параметров вращения ВПО ( $T_0$ ,  $\omega_0$ ):

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{T}} &= (S + E)^{-1} \cdot [M^{-1} \cdot B_m \cdot \mathbf{T}_m - \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}}], \\ \tilde{\mathbf{a}} &= M^{-1} \cdot B_a^{-1} \cdot \mathbf{a}_m - \omega_0^2 \cdot [0 \quad y_a \quad z_a]^T, \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}} &= M^{-1} \cdot B_r^{-1} \cdot \boldsymbol{\omega}_m - [\omega_0 \quad 0 \quad 0]^T, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tilde{\mathbf{T}}$ ,  $\tilde{\mathbf{a}}$ ,  $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$  – векторы напряженности результирующего магнитного поля, кажущегося ускорения и собственной угловой скорости вращения ВПО, приведенные к немагнитному невращающемуся основанию;  $B_m$ ,  $B_a$ ,  $B_r$  – матрицы сборки блоков ТБМ, ТБА, ТБГ;  $M$  – матрица монтажа (установки) на ПО модуля (ТБМ+ТБА+ТБГ);  $S$  – матрица коэффициентов Пуассона ( $3 \times 3$ );  $E$  – единичная матрица ( $3 \times 3$ );  $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}}$  – вектор напряженности постоянной составляющей магнитного поля объекта (МПО);  $\omega_0$  – угловая скорость вращения ВПО вокруг продольной оси  $X$ ;  $y_a$ ,  $z_a$  – координаты точки установки ТБА в связанном трехграннике  $m$ .

С учетом корректировки показаний блоков по формулам (5) уравнения, описывающие формирование показаний блоков ( $\mathbf{T}_m$ ,  $\mathbf{a}_m$ ,  $\boldsymbol{\omega}_m$ ), можно привести к системе укороченных векторно-матричных уравнений:

$$\tilde{\mathbf{T}} = A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}, \quad \tilde{\mathbf{a}} = A \cdot \mathbf{a}_s, \quad \tilde{\boldsymbol{\omega}} = A \cdot \boldsymbol{\omega}_s, \quad (6)$$

где  $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ ,  $\mathbf{a}_s$ ,  $\boldsymbol{\omega}_s$  – соответствующие векторы, заданные в осях географического трехгранника  $s = NHE$  ( $N$ ,  $E$ ,  $H$  – направления на географический север, восток и вертикаль, соответственно).

Приведенные к немагнитному основанию значения амплитуд и фаз гармонических сигналов поперечных магнитометров в проекциях на оси резалевого трехгранника определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{ym} = \tilde{T}_{zm} &= \left[ (T_N \sin(\psi) + T_E \cos(\psi))^2 + ((T_E \sin(\psi) - T_N \cos(\psi)) \sin(\vartheta) + T_H \cos(\vartheta))^2 \right]^{1/2}, \\ \text{tg}(\tilde{\varphi}_m) &= \frac{(T_E \sin(\psi) - T_N \cos(\psi)) \sin(\vartheta) + T_H \cos(\vartheta)}{T_N \sin(\psi) + T_E \cos(\psi)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\tilde{T}_{ym}$ ,  $\tilde{T}_{zm}$  – амплитуды входных сигналов поперечных  $Y$ - и  $Z$ -магнитометров, приведенные к немагнитному основанию и резалевому трехграннику;  $\psi$ ,  $\vartheta$  – углы курса и тангажа.

Приведенные к резалевому трехграннику значения амплитуд и фаз гармонически изменяющихся сигналов поперечных акселерометров и гироскопов можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{ym} = \tilde{a}_{zm} &= \left[ (\dot{\psi}v - g_N \sin(\psi))^2 + (g_N \cos(\psi) \sin(\vartheta) - g_H \cos(\vartheta))^2 \right]^{1/2}, \\ \text{tg}(\tilde{\varphi}_a) &= \frac{g_N \cos(\psi) \sin(\vartheta) - g_H \cos(\vartheta)}{\dot{\psi}v - g_N \sin(\psi)} \approx \frac{g \cos(\vartheta)}{\dot{\psi}v}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{ym} = \tilde{\omega}_{zm} &= [(\Omega \cos(\varphi) \sin(\psi) + \dot{\vartheta} \cos(2\psi))^2 + \\ &+ (\Omega(\sin(\varphi) \cos(\vartheta) - \cos(\varphi) \cos(\psi) \sin(\vartheta)) + \dot{\psi} \cos(\vartheta) + 0,5\dot{\vartheta} \sin(2\psi) \sin(\vartheta))^2]^{1/2}, \\ \text{tg}(\tilde{\varphi}_r) &= \frac{\Omega(\sin(\varphi) \cos(\vartheta) - \cos(\varphi) \cos(\psi) \sin(\vartheta)) + \dot{\psi} \cos(\vartheta) + 0,5\dot{\vartheta} \sin(2\psi) \sin(\vartheta)}{\Omega \cos(\varphi) \sin(\psi) + \dot{\vartheta} \cos(2\psi)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\tilde{a}_{ym}$ ,  $\tilde{a}_{zm}$ ,  $\tilde{\omega}_{ym}$ ,  $\tilde{\omega}_{zm}$  – амплитуды входных сигналов поперечных  $Y$ - и  $Z$ -акселерометров и гироскопов, приведенные к резалевому трехграннику;  $v$  – скорость движения ВПО;  $\dot{\psi}$ ,  $\dot{\vartheta}$  – угловые скорости искривления траектории ВПО в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $g_N$ ,  $g_H$  – северная и вертикальная составляющие вектора удельной силы тяжести  $\mathbf{g}$  в неподвижном трехграннике  $s = NHE$ ;  $\varphi$  – географическая широта.

Анализ выражений (5) для приведенных показаний ТБМ, ТБА и ТБГ показывает, что скорректированные сигналы блоков ( $\tilde{\mathbf{T}}, \tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\boldsymbol{\omega}}$ ) практически совпадают с их истинными входными сигналами ( $\mathbf{T}_m, \mathbf{a}_m, \boldsymbol{\omega}_m$ ), сдвинутыми на величины, соответствующие нулевым смещениям ( $\Delta\mathbf{u}_m, \Delta\mathbf{u}_a, \Delta\mathbf{u}_r$ ) и детерминированным сдвигам ( $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}}, \boldsymbol{\omega}_0, \omega_0^2 \mathbf{r}_a$ ) с учетом приведения к резальевому трехграннику. Анализ гармонических функций (3), характеризующих формирование выходных сигналов поперечных датчиков, показывает, что колебания выходных сигналов магнитометров и гироскопов синхронны с колебаниями выходных сигналов  $u_{ya}(\omega_0 t), u_{za}(\omega_0 t)$  поперечных акселерометров, но сдвинуты относительно них на фазовые углы ( $\Delta\varphi_m, \pi/2 + \Delta\varphi_m, \Delta\varphi_r, \pi/2 + \Delta\varphi_r$ ) соответственно.

Таким образом, как гармонические колебания приведенных сигналов поперечных датчиков, так и гармонические колебания первичных сигналов этих датчиков (до приведения), записанные в соответствии с выражением (3), несут в себе информацию о текущем угле вращения  $\gamma$  ВПО и углах ориентации его продольной оси  $X$  в пространстве ( $\psi, \vartheta$ ). На основании выражений (3) можно получить формулы для вычисления функций угла вращения ВПО по акселерометрическим, магнитометрическим и тахометрическим каналам:

$$\sin(\gamma) = \frac{u_{za}}{U_{za}}, \quad \sin(\gamma + \Delta\varphi_m) = \frac{u_{zm}}{U_{zm}}, \quad \sin(\gamma + \Delta\varphi_r) = \frac{u_{zr}}{U_{zr}}, \quad (10)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{u_{ya}}{U_{ya}}, \quad \cos(\gamma + \Delta\varphi_m) = \frac{u_{ym}}{U_{ym}}, \quad \cos(\gamma + \Delta\varphi_r) = \frac{u_{yr}}{U_{yr}}. \quad (11)$$

На основании выражений (10) и (11) возможно вычисление функций  $\sin(\gamma)$  и  $\cos(\gamma)$ . Алгоритмы АГ гармонического способа вычислений углов маневрирования  $\psi$  и  $\vartheta$  ВПО в настоящей работе не приводятся.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов В. А. Система стабилизации и наведения линии визирования с уменьшенными габаритами и особенности ее динамики // XV Юбилейная С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 26–28 мая 2008 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 166–168.

2. Белобрагин В. Н., Зайцев В. Д., Распопов В. Я., Горин В. И., Горин А. А., Дмитриев В. А., Сорокин В. И., Ермилов С. П. Опыт разработки гироскопов для вращающихся по крену изделий // XII С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. С. 183–194.

3. Царев И. В., Шило В. В., Бортовик В. Б., Дмитриев В. А., Ермилов С. П., Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Алалуев Р. В. Разработка магнитометриче-

ского измерителя текущего положения // XII С.-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. С. 215–217.

4. *Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Аладуев Р. В.* Малогабаритная система ориентации // Датчики и системы. 2004. № 8. С. 2–5.

5. Пат. 2256881 С2 Российская Федерация, МПК G01C 21/16. Способ определения параметров ориентации и навигации и бесплатформенная инерциальная навигационная система для быстровращающихся объектов / заявители Ачильдиев В. М., Мезенцев А. П., Решетников В. И., Сысоев И. В., Трешкин А. И. ; патентообладатель ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова». – № 2003107688/28 ; заявл. 21.03.2003 ; опубл. 20.07.2005, Бюл. 20. – 11 с.

6. *Погорелов М. Г., Шведов А. П., Малютин Д. М.* Система ориентации подвижного объекта по показаниям магнитных датчиков // Датчики и системы. 2004. № 5. С. 51–54.

7. Пат. 2130588 С1 Российская Федерация, МПК G01C 21/08, G01C 21/12, G01C 17/38. Способ измерения магнитного курса подвижного объекта / заявители Архипов В. А., Ветошкина Н. К., Зузлов В. Ф., Лебедев С. О., Потапов А. А., Олаев В. А. ; патентообладатель ОАО «Чебоксарский приборостроительный завод "Элара"». – № 98108097/28 ; заявл. 23.04.1998 ; опубл. 20.05.1999, Бюл. 16. – 12 с.

8. Пат. RU 2527369 С1 Российская Федерация, МПК F42В 15/01, G01C 21/08. Способ определения угла крена вращающегося по крену летательного аппарата / заявители Шипунов А. Г., Бабичев В. И., Морозов В. И., Шигин А. В., Рабинович В. И., Долгова Т. С., Акулинин С. И., Менькин В. Б., Бальзамов И. А. ; патентообладатель ОАО «Конструкторское бюро приборостроения имени ак. А. Г. Шипунова». – № 2013115672/11 ; заявл. 09.04.2013 ; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. – 17 с.

9. *Кринецкий Е. И.* Системы самонаведения. М. : Машиностроение, 1970. 236 с.

10. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Васильев А. В.* Алгоритмы работы миниатюрной системы ориентации вращающихся подвижных объектов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 78–91.

11. Магниторезистивные датчики магнитного поля Honeywell. URL : <http://www.honeywell.com/magneticsensors> (дата обращения : 01.05.2015).

12. *Анучин О. Н., Емельянцева Г. И.* Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 357 с.

13. *Матвеев В. В., Распопов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2009. 280 с.

14. *Розенцвейн В. Г.* Современное состояние скваженных гироскопических навигационных систем // Применение гравиинерциальных технологий в геофизике : сб. ст. и докл. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. С. 146–167.

15. *Проскуряков Г. М., Игнатъев А. А., Васильев А. В., Маслов А. А.* Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (хронометрический способ автономной ориентации) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 18 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 53–62.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
БАЛЛИСТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ  
ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ АКСИАЛЬНО-НАМАГНИЧЕННЫХ  
КОЛЬЦЕВЫХ МАГНИТОВ**

**С. П. Кудрявцева, А. Н. Петров**

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

Представлены результаты исследования зависимости баллистического коэффициента размагничивания от геометрических размеров аксиально-намагниченных кольцевых магнитов из высококоэрцитивных магнитных материалов.

*Ключевые слова:* магнит, намагниченность, коэффициент размагничивания.

**Theoretical Research of Ballistic Demagnetization Factor According  
to Geometrical Dimensions of Axially Magnetized ring Magnets  
from High-Coercive Magnetic Materials**

**S. P. Kudryavceva, A. N. Petrov**

In the paper the results of theoretical research of ballistic demagnetization factor according to geometrical dimensions of axially magnetized ring magnets from high-coercive magnetic materials are presented.

*Key words:* magnet, magnetization, demagnetization factor.

Для определения намагниченности ферромагнитных тел конечных размеров возникает необходимость знания внутренних размагничивающих магнитных полей, зависящих от формы и геометрических размеров тел [1–4].

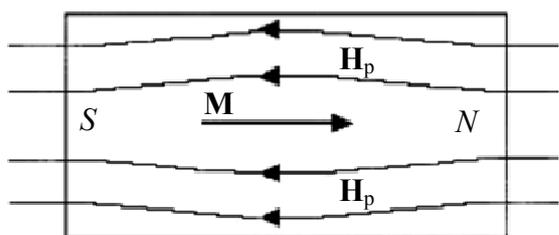


Рис. 1. Намагниченный параллелепипед

Тело с разомкнутой магнитной цепью в виде параллелепипеда с намагниченностью  $\mathbf{M}$  изображено на рис. 1. В разомкнутой магнитной цепи существует скачок вектора намагниченности на границах раздела магнетика ( $\mathbf{M} \neq 0$ ) и воздуха ( $\mathbf{M} = 0$ ). В результате возникают так называемые полюса: северный  $N$  и южный  $S$ , которые сами являются источниками внутреннего магнитного поля, направленного противоположно намагниченности  $\mathbf{M}$ , называемого поэтому полем размагничивания  $\mathbf{H}_p$ . Связь между векторами  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{H}_p$  выражается соотношением

$$\mathbf{H}_p = -N_p \cdot \mathbf{M}, \quad (1)$$

где  $N_p$  – коэффициент размагничивания, зависящий от формы и размеров образца. Значение  $N_p$  уменьшается с увеличением длины образца при условии, что длина определяется в направлении намагничивания.

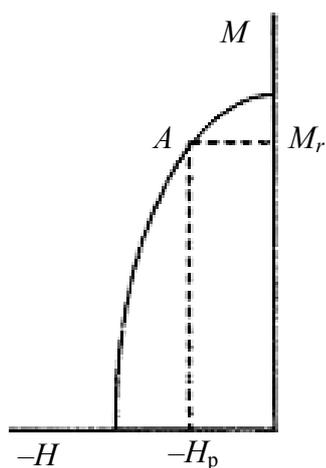


Рис. 2. Кривая размагничивания

По известному коэффициенту формы  $N_p$  и намагниченности материала  $\mathbf{M}$  определяется напряженность размагничивающего поля (1). Значению  $H_p$  на кривой размагничивания петли гистерезиса, изображенной на рис. 2, соответствует так называемая рабочая точка  $A$  и остаточная намагниченность  $M_r$  образца.

В зависимости от способа определения коэффициентов размагничивания принято подразделять их на баллистический  $N_b$  и магнитометрический  $N_m$  [5, 6].

Баллистический коэффициент размагничивания  $N_b$  характеризует среднюю величину внутреннего размагничивающего поля по нейтральному сечению образца ( $A-A$  на рис. 3), а магнитометрический  $N_m$  – по объёму образца.

Авторами проведено теоретическое исследование зависимости баллистического коэффициента размагничивания от геометрических размеров аксиально-намагниченного кольцевого магнита, изображенного на рис. 4.

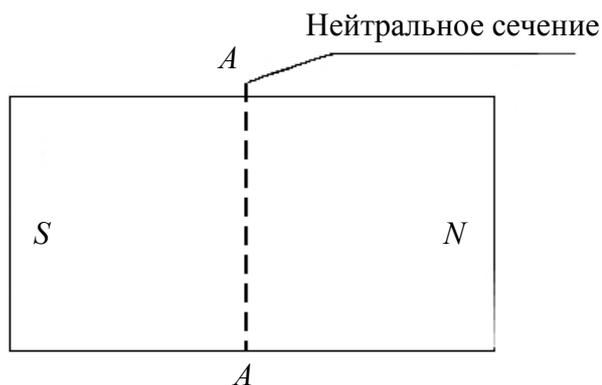


Рис. 3. Намагниченный образец

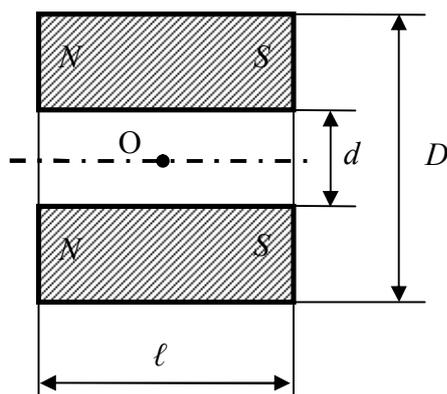


Рис. 4. Сечение аксиальнонамагниченного кольцевого магнита

Расчеты коэффициентов размагничивания проведены на основе выражения, полученного в работе [4], с использованием метода фиктивных магнитных зарядов:

$$N_b = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1-q}{p} - \frac{p}{\pi(1-q)} \ln \left[ 1 + \left( \frac{1-q}{p} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $q = \frac{d}{D}$ ,  $p = \frac{\ell}{D}$ . Относительные размеры выбирались в соответствии с размерами промышленно выпускаемых магнитов из высококоэрцитивных материалов. Расчетные зависимости баллистического коэффициента размагничивания от относительной длины магнитов и отношения их диаметров приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

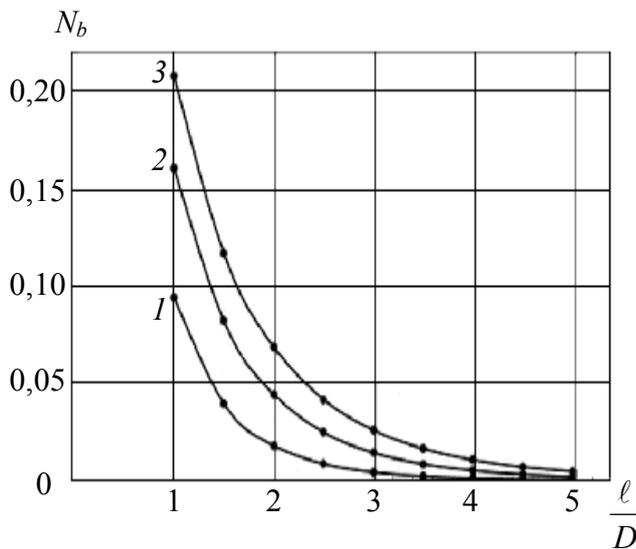


Рис. 5. Зависимость баллистического коэффициента размагничивания от относительной длины аксиально-намагниченных кольцевых магнитов для различных значений отношения диаметров  $\frac{d}{D}$ : 1 – 0,6; 2 – 0,4; 3 – 0,2

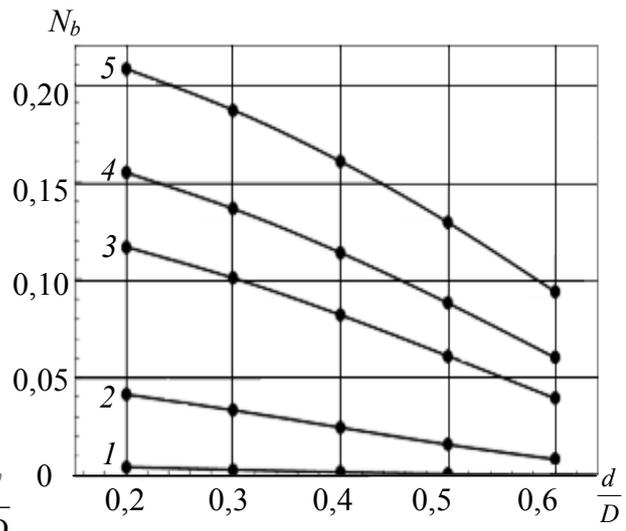


Рис. 6. Зависимость баллистического коэффициента размагничивания от отношения диаметров аксиально-намагниченных кольцевых магнитов для различных значений относительной длины магнитов  $\frac{\ell}{D}$ : 1 – 5; 2 – 4; 3 – 3; 4 – 2; 5 – 1

Полученные зависимости отвечают факту увеличения коэффициента размагничивания, а следовательно, и величине размагничивающего поля при уменьшении длины магнита  $\ell$  в направлении намагничивания. При значениях  $\frac{\ell}{D} \geq 3$  величина коэффициента размагничивания резко уменьшается и составляет 0,1 и менее в диапазоне значений  $\frac{d}{D}$  от 0,3 до 0,6.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы в инженерной практике при разработке аксиально-намагниченных кольцевых магнитов из высококоэрцитивных материалов и для выполнения лабораторной работы по определению намагниченности магнитов в физическом практикуме «Физика магнитных явлений».

#### Библиографический список

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М. : Физматлит, 2003. 616 с.
2. Мельников Ю. А., Спиридонов Р. В. Определение коэффициентов размагничивания магнитов на основе редкоземельных элементов с кобальтом // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1979. Вып. 6. С. 75–79.
3. Ягола Г. К., Спиридонов Р. В. Измерение магнитных характеристик современных магнитотвердых материалов. М. : Изд-во стандартов, 1989. 119 с.
4. Ягола Г. К., Спиридонов Р. В. Определение характеристик высококоэрцитивных материалов и магнитов из них в разомкнутой магнитной цепи // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1979. Вып. 15(662). С. 10–16.
5. Игнатьев А. А., Кудрявцева С. П., Куликов М. Н., Страхова Л. Л. Руководство к лабораторным работам по курсу «Физика магнитных явлений». Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2009. С. 39–48.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 001.891, 001.895

## МАГИСТЕРСКАЯ ПРОГРАММА «МАГНИТОЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ И БЕЗОПАСНОСТИ»

**А. А. Игнатьев, С. П. Кудрявцева, Л. А. Романченко**

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

В статье подробно изложена структура магистерской программы «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности», представлены особенности обучения по данной программе.

*Ключевые слова:* магистерская программа, магнитоэлектроника, система защиты информации.

### **Master program «Magnetoelectronics in the Systems of Information Protection and Safety»**

**A. A. Ignatiev, S. P. Kudryavceva, L. A. Romanchenko**

The structure of master program «Magnetoelectronics in the systems of information protection and safety» and education specificity are described in details in the the paper.

*Key words:* master program, magnetoelectronics, system of information protection.

Магистерская программа «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» по направлению подготовки «Физика» разработана кафедрой общей физики физического факультета Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (СГУ) и реализуется с 2013 года. Данная программа отражает научные направления кафедры общей физики и базовой кафедры физики критических и специальных технологий физического факультета:

- исследование магнитоэлектронных устройств активного типа для систем защиты информации и безопасности, развиваемое в СГУ с 1995 г.;
- датчикоостроение на единой базе для автономной геомагнитной навигации и ориентации различных подвижных объектов.

При разработке магистерской программы «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» был учтен опыт, приобретенный при реализации двух предшествующих программ подготовки магистров – «Физика современных радиоэлектронных технологий» [1] и «Физика микро- и низкоразмерных система с цифровыми технологиями» [2]. Для обучения по магистерской программе «Магнитоэлектроника в системах

защиты информации и безопасности» студенты должны обладать базовыми знаниями, которые обеспечивают по направлению «Физика», профилю «Фундаментальная и экспериментальная физика» соответствующие дисциплины [3]. Согласно учебному плану студенты изучают обязательные дисциплины и дисциплины по выбору [4].

Обязательные дисциплины первого года обучения:

- «Философские вопросы естествознания»;
- «Специальный физический практикум»;
- «Компьютерные технологии в науке и образовании»;
- «Физика квантово-размерных структур»;
- «Аналитические методы теории флуктуационных процессов»;
- «Функциональный анализ физических задач»;
- «Современные проблемы физики»;
- «История и методология физики»;
- «Современные системы автоматизированного проектирования микро- и наноструктурных устройств»;
- «Магнетизм в квантово-размерных структурах»;
- «Системное моделирование на языке описания аппаратуры»;
- «Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника в системах информации и безопасности».

Обязательные дисциплины второго года обучения:

- «Специальный физический практикум»;
- «Синтез цифровых устройств на базе ПЛИС»;
- «Анализ и синтез моделей физических систем с дискретным временем»;
- «Моделирование полупроводниковых приборов и устройств для систем информации и безопасности».

В первый год обучения студентам предлагается выбрать для изучения две дисциплины из двух блоков (по одной из каждого блока):

- 1) «Физические принципы записи и хранения информации», «Криптографические и стеганографические методы и средства защиты информации»;
- 2) «Методы обработки результатов эксперимента», «Микро- и наноструктурные датчики физических величин в системах информации и безопасности».

Во второй год обучения студентам предлагается для изучения три дисциплины по выбору из трех блоков (по одной из каждого блока):

- 1) «Введение в компьютерную графику и методы визуализации эксперимента», «Введение в методы кодирования данных»;
- 2) «Микропроцессорные средства автоматизации», «Алгоритмы точных машинных вычислений»;
- 3) «Технические средства защиты информации для гетеромагнитных микро- и наноустройств», «Методы шифрования и дешифрования информации для систем безопасности».

Магистранты могут дополнительно изучать факультативные дисциплины:

– на 1-м курсе – «Формирование, обработка и средства передачи информации», «Научный отчет: структура и критерии»;

– на 2-м курсе – «Физика сильных электромагнитных полей».

Ниже приводится краткое содержание дисциплин, изучение которых формирует у студентов профессиональные компетенции в соответствии с направлением подготовки.

В рамках дисциплины «Физические принципы записи и хранения информации» изучается роль устройств записи и хранения информации в современных системах ее передачи и обработки. Студенты знакомятся с техническими устройствами, физическими принципами магнитной, оптической и магнитооптической записей аналоговых и цифровых сигналов, проблемами сохранности и защиты записанной информации от случайных и умышленных воздействий, а также с вопросами использования устройств записи в системах наблюдения и охраны.

В курсе «Криптографические и стеганографические методы и средства защиты информации» рассматриваются основные направления деятельности в области криптографической и стеганографической защиты информации. Кроме того, изучаются особенности различных сфер применения криптографических и стеганографических методов и средств, основные методы и средства защиты информации.

Вопросы криптографии с симметричными ключами (симметричное шифрование) и шифрования с помощью асимметричных ключей (асимметричное шифрование) изучаются в рамках дисциплины «Методы шифрования и дешифрования информации для систем безопасности». В первой части курса описываются различные подходы к процессу шифрования и дешифрования с симметричными ключами. Во второй части показано, как асимметричное шифрование может обеспечить безопасность информации. Приводятся различные методы шифрования и алгоритмы дешифрования.

При освоении дисциплины «Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника в системах информации и безопасности» студенты изучают физические основы гетеромагнитной микро- и наноэлектроники, основные направления и методы компьютерного проектирования магниточувствительных микросистем, возможности применения современных систем автоматизированного проектирования (САПР), основные направления разработок новых типов гетеромагнитных первичных преобразователей, цифровых датчиковых систем, управляемых устройств активного типа в различных участках частотного диапазона радиоволн (УВЧ, СВЧ, КВЧ, ТВЧ), методы и средства расчета тепловых режимов гетеромагнитных микросистем. Научное направление, изучаемое в рамках данной дисциплины, удовлетворяет критериям прорывных технологий, характеризуется повышенной наукоемкостью, сочетает как физические теории и методы проектирования, так и прикладные аспекты: магнитные нанотехнологии и магнитные наноматериалы в магнитоэлектронике. Во время обучения студенты могут предла-

гать, обосновывать, проектировать и реализовывать на практике принципиально новые устройства, микросистемы, технологии. Теоретический курс подкрепляется новым лабораторным практикумом, оснащенным передовым, современным, уникальным оборудованием.

Целью освоения специальной дисциплины «Моделирование полупроводниковых приборов и устройств для систем информации и безопасности» является изучение современных методов расчета и моделирования полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники, микро- и наноэлектронных устройств. В процессе обучения студенты овладевают математическими методами расчета линейных и нелинейных схем, моделированием типовых СВЧ-элементов: пассивных двухполюсников, полевых транзисторов, микрополосковых линий, электродинамических структур.

Изучив дисциплину «Моделирование полупроводниковых приборов и устройств для систем информации и безопасности», студент должен уметь самостоятельно разрабатывать и моделировать аналоговые и цифровые микроустройства, применять знания для создания новых твердотельных, в том числе низкоразмерных, сред при производстве электронных устройств нового поколения, владеть методиками моделирования полупроводниковых приборов, микро- и наноустройств, методами экспериментального исследования.

Ознакомление с различными видами угроз информационным ресурсам, каналами утечки информации, моделями нарушителя и его потенциальными возможностями по несанкционированному доступу и съему информации осуществляется в рамках дисциплины «Технические средства защиты информации для гетеромагнитных микро- и наноустройств». В курсе рассматриваются различные классы современных технических средств защиты информации, изучаются их принципы действия, характеристики и функциональные возможности. В процессе обучения студенты должны приобрести навыки практической работы с приборами и умение ориентироваться при решении конкретных задач в выборе тех или иных приборов и устройств.

Кафедра общей физики СГУ занимается исследованиями и научными разработками по геомагнитной тематике и датчикостроению на новой единой элементной базе и технологиях. Датчики являются неотъемлемой частью многих информационных систем. В связи с этим в учебный план включена такая дисциплина, как «Микро- и наноструктурные датчики физических величин в системах информации и безопасности». Целью ее освоения является изучение современных методов измерения физических величин, используемых в соответствующих датчиковых системах, принципов построения таких систем, использующих современные микро- и наноструктуры. В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать основы и методы измерения физических величин, факторы, влияющие на погрешность измерений, способы минимизации их влияния, принципы построения и характеристики современных систем на основе датчиков, современные достижения в области наноматериалов и нанотехнологий. При проведении лабораторных занятий студенты учатся качественно и количественно оценивать:

- физические процессы, связанные с измерением физических величин конкретной информационной системы;
- факторы, влияющие на точность проводимых измерений, с помощью той или иной системы.

В результате изучения дисциплины «Методы обработки результата эксперимента» студенты должны уметь извлечь из экспериментальных данных максимальное количество полезной и достоверной информации, правильно ее интерпретировать, сделать выводы и уже на их основе планировать свои дальнейшие действия по проведению эксперимента.

Неотъемлемой и очень важной частью обучения по магистерской программе «Магнитоэлектроника в системах информации и безопасности» являются практики студентов. Во время прохождения практик происходит закрепление и углубление теоретической подготовки обучающегося и приобретение им практических навыков и компетенций в сфере профессиональной деятельности.

Педагогическая практика проводится на кафедре общей физики, научно-исследовательская и научно-производственная – на базовой кафедре физики критических и специальных технологий в ОАО «Институт критических технологий» (г. Саратов).

Основными задачами практик являются:

- освоение педагогических приемов и методов ведения семинарских занятий и лабораторных практикумов;
- ознакомление с содержанием основных работ, инновационных исследований и разработок, выполняемых на предприятии или в организации по месту прохождения практики;
- изучение организационной структуры предприятия и действующей в нем системы управления;
- закрепление теоретических знаний, полученных при изучении базовых дисциплин;
- приобретение специальных навыков, необходимых для обработки, анализа и синтеза информации, полученной в результате экспериментов;
- участие в разработке организационно-методических и нормативных документов для решения отдельных задач по месту прохождения практики;
- освоение приемов, методов и способов выявления, наблюдения, измерения и контроля параметров производственных технологических и других процессов.

Во время прохождения практик студенты принимают участие в конкретных производственных процессах и проводимых исследованиях, включая инновационные, и приобретают практические навыки, необходимые для будущей профессиональной деятельности, в том числе педагогической.

Цель педагогической практики заключается в том, чтобы сформировать и закрепить профессиональные навыки проведения практических занятий с обучающимися.

Цель научно-производственной практики состоит в том, чтобы путем непосредственного участия студента в деятельности производственной или научно-исследовательской организации закрепить теоретические знания, полученные во время аудиторных занятий, учебных практик, приобрести профессиональные умения и навыки и собрать необходимый материал для написания выпускной квалификационной работы.

Во время научно-производственной практики происходит приобщение студента к социальной среде предприятия (организации) и приобретение им социально-личностных компетенций, необходимых для работы в профессиональной сфере, участия в инновационных исследованиях и разработках.

Особое место при обучении по программе магистратуры занимает научно-исследовательская работа, на которую отводится большое количество учебного времени.

Выбирается тема исследований и составляется календарный план мероприятий по ее выполнению. Во время выполнения научно-исследовательской работы возможна корректировка плана. Промежуточные результаты исследования представляются на научных семинарах. По итогам выполнения работы составляется отчет.

Обучение по программе «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» обеспечено:

- фактическим учебно-методическим материалом, сопровождающим учебный процесс;

- информационной и материально-технической базой, уникальным научным и технологическим оборудованием, приобретенными СГУ в рамках инновационных образовательных программ в 2007–2013 гг., передовыми лицензионными САПР для проектирования магнитоэлектронных микро- и наноразмерных систем защиты информации и безопасности с цифровыми технологиями, включая магниточувствительные и гетеромагнитные;

- передовыми технологиями для изготовления магнитоэлектронных микро- и наноразмерных систем.

Для выполнения научно-исследовательской и выпускной квалификационной работ студенту предоставляются рабочее место в компьютерном классе с доступом к сети Интернет и возможность работать на инновационном оборудовании.

Программа «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» обеспечивает подготовку магистров для научно-исследовательских и производственных организаций, развивающих инновационные гетеромагнитные технологии на основе микро- и наноэлектронной базы при разработке новых типов датчиковых систем для автономной геомагнитной навигации, спецсистем вооружения, дефектоскопии, новых аппаратных устройств для систем защиты информации, безопасности и противодействия терроризму.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Куликов М. Н., Овчинников С. В., Романченко Л. А., Страхова Л. Л.* Подготовка магистров по программе 510416 «Физика современных радиоэлектронных технологий» // Полипарадигмальный подход к модернизации современного образования : сб. науч. тр. Пятой Междунар. заочной науч.-метод. конф. : в 2 ч. Ч. 1. Саратов : Научная книга, 2008. С. 186–190.

2. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Подготовка бакалавров по профилю «Физика микро- и низкоразмерных структур с цифровыми технологиями» направления 011200 «Физика» // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2012. Вып. 12 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 95–101.

3. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Обучение по направлению «Физика» : от профиля бакалавриата «Фундаментальная и экспериментальная физика» к магистерской программе «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» // Российское педагогическое образование в условиях модернизации : сб. науч. тр. 9-й Междунар. заочной науч.-метод. конф. Саратов : Наука, 2013. С. 125–127.

4. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Реализация магистерской программы «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» направления 011200 «Физика» // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 75–78.

УДК 372.853

### **СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН**

**Л. А. Романченко**

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

В статье описаны варианты применения современных образовательных технологий при преподавании специальных дисциплин магистерской программы «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» с учетом ее специфики.

*Ключевые слова:* образовательная технология, магистерская программа, специальная дисциплина.

### **Modern educational technologies in the teaching of special courses**

**L. A. Romanchenko**

In the paper the various methods of using modern educational technologies in the teaching of special courses of magister program «Magnetoelectronics in the information protection and safety systems» are described taking into account their specific features.

*Key words:* educational technology, master program, special course.

Учебный план программы подготовки магистров «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» содержит 26 дисциплин, 20 из которых отражают узкую направленность данной магистерской программы. Согласно учебному плану время, предназначенное для самостоятельной работы студентов-магистрантов, почти равно времени аудиторных занятий. Но для целого ряда специальных дисциплин более 50% учебного времени отводится на самостоятельную работу. К таким дисциплинам относятся: «Специальный физический практикум», «Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника в системах защиты информации и безопасности», «Современные системы автоматизированного проектирования микро- и наноструктурных устройств», «Моделирование полупроводниковых приборов и устройств для систем информации и безопасности», «Теория магнитной записи информации», «Теория теплопроводности», «Методы обработки результатов эксперимента», «Алгоритмы точных машинных вычислений», «Магнитоуправляемые наночастицы для медицинских исследований», «Магнетизм в квантово-размерных структурах», «Системное моделирование на языке описания аппаратуры» [1, 2]. Большое количество часов, отведённых на самостоятельную работу студентов, в сравнении с относительно небольшой аудиторной нагрузкой, предполагает использование новых образовательных технологий при обучении. Актуальными становятся современные образовательные технологии [3–5].

Традиционные пассивные классические технологии в виде чтения лекций оказываются малоэффективными, так как большинство вопросов и проблем, изучаемых в рамках спецкурсов, требуют постоянного вовлечения студента в диалог с преподавателем. Хорошей заменой лекции как источника информации являются лекции-установки или лекции-проблемы. Перед каждой из таких лекций студенты заблаговременно обеспечиваются преподавателем теоретическим материалом по заданной тематике. На самих лекциях преподаватель должен кратко изложить аспекты по заданной теме, обозначить проблемы, возникающие в ходе теоретических и экспериментальных исследований, и наметить для студентов пути их решения. В дальнейшем студенты в ходе обсуждения самостоятельно ищут решение поставленных задач, пользуясь и изложенным материалом, и литературой, и интернет-источниками, а также выполняя лабораторную работу при необходимости.

По мере того как студентами осваивается довольно большой объем учебного материала, имеет смысл проводить также групповые или индивидуальные консультации. Групповые консультации представляют собой своеобразную форму проведения лекционных занятий, основным содержанием которых является разъяснение отдельных, часто наиболее сложных или практически значимых вопросов изучаемой программы [6]. Если лекционные занятия не подкрепляются лабораторными или практическими работами, то для внесения разнообразия в учебный процесс и повышения эффективности обучения необходимо использовать такие интерактивные образовательные технологии, как, например, дискуссионные технологии. Дискуссионные технологии могут иметь разные формы: дебаты, пленарная дискус-

сия, круглый стол, симпозиум и др. Дискуссия учит студентов выражать и обосновывать свою научную точку зрения, дебатировать, слушать оппонентов, формулировать и задавать вопросы, оценивать и критиковать. Для проведения симпозиума необходимо, чтобы один или два студента выступили с кратким докладом-сообщением, после чего ответили бы на вопросы аудитории. Во время форума назначается экспертная группа студентов, которые заранее должны подготовиться по теме занятия и вступить в обмен мнениями с «аудиторией». На форуме обычно обсуждается одна проблема.

Дисциплины «Специальный физический практикум» и «Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника в системах защиты информации и безопасности» связаны с проведением эксперимента, так как предполагают проведение лабораторных занятий. Любое из таких занятий может включать в себя все перечисленные выше виды деятельности: лекцию-установку, лекцию-проблему, дискуссию и, как итог, непосредственное выполнение лабораторной работы. Лабораторные занятия, так же как и лекции-установки, являются активными классическими технологиями и по-прежнему остаются очень востребованными, так как в процессе их выполнения у студентов формируются практические профессиональные навыки, навыки обращения со специальной измерительной аппаратурой и лабораторными установками. Необходимо отметить, что большинство лабораторных работ в специальных физических практикумах являются очень трудоемкими. Как правило, в ходе выполнения работы студенты проводят большое количество различных измерений в разных режимах. Кроме того, для «погружения» студента в профессиональную деятельность предлагается не только произвести измерения, но и самостоятельно собрать экспериментальную установку, пользуясь схемой и инструкцией. Расчеты и построение графиков, необходимые для оформления результатов, также требуют от студентов довольно большого объема времени самостоятельной работы.

Обучение студентов с применением описанных образовательных технологий требует от преподавателя более интенсивной подготовки. Во время занятия необходимо поддерживать высокий темп общения, следить за вовлеченностью в процесс каждого студента. Все это, безусловно, требует от преподавателя высокого профессионализма и больших временных затрат. Необходимо отметить, что результат обучения во многом зависит от творческого подхода самих студентов, уровня подготовленности группы и даже от психологических особенностей студентов. Все эти факторы преподавателю необходимо учитывать.

Предложенный механизм применения образовательных технологий был опробован в рамках изучения дисциплины «Основы физики полупроводниковых микроструктур» направления «Физика» [7]. В результате студенты проявляли заинтересованность, занятия проходили очень активно. Это свидетельствует об очевидном положительном эффекте, который дает применение современных образовательных технологий при изучении специальных дисциплин.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Магистерские программы и перспективы развития магистратуры на кафедре общей физики СГУ // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 14 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 123–130.
2. *Игнатъев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.* Реализация магистерской программы «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности» направления 011200 «Физика» // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 16 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 75–78.
3. *Недогреева Н. Г., Ступина С. Б.* Роль современных образовательных технологий в процессе обучения // Образование в современном мире : сб. науч. ст. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2007. Вып. 2. С. 192–197.
4. *Недогреева Н. Г., Просвирнина И. А.* Анализ различных аспектов понятия «технология» в педагогике // Вестн. Саратов. госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2006. № 5, вып. 3. С. 102–106.
5. *Селевко Г. К.* Современные образовательные технологии : учеб. пособие. М. : Народное образование, 1998. 256 с.
6. *Савельева М. Г., Новикова Т. А., Костина Н. М.* Использование активных и интерактивных образовательных технологий : метод. рекомендации. Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2013. 44 с.
7. *Романченко Л. А.* Применение современных образовательных технологий при преподавании дисциплины «Основы физики полупроводниковых микроструктур» // Воспитательный потенциал инновационной образовательной среды : сб. науч. тр. Одиннадцатой Междунар. науч.-метод. конф. Саратов : Изд-во СРОО «Центр "Просвещение"», 2015. С. 278–281.

# ЭКОНОМИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 330.322

## ИНВЕСТИРОВАНИЕ НАУКОЕМКИХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Д. А. Плотников, А. Н. Плотников

Саратовский государственный технический университет  
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77  
E-mail: a.n.plotnikov@mail.ru

Статья посвящена проблемам инвестирования наукоемких высокотехнологичных инновационных предприятий. Раскрыты понятия инвестиций, инвестирования, инноваций. Исследованы возможные источники инвестирования инновационной деятельности малых наукоемких высокотехнологичных предприятий.

*Ключевые слова:* инвестиция, инвестирование, инновация, инновационная деятельность, наукоемкое высокотехнологичное предприятие, источник инвестирования.

### Investment the Knowledge-Intensive Hi-Tech Innovative Enterprises

D. A. Plotnikov, A. N. Plotnikov

Article is devoted to problems of investment of the knowledge-intensive hi-tech innovative enterprises. Concepts of investments, investments, innovations are opened. Possible sources of investment of innovative activity of the small knowledge-intensive hi-tech enterprises are investigated.

*Key words:* investment, investment, innovation, innovative activity, knowledge-intensive hi-tech enterprise, investment source.

С переходом к рыночной экономике становится понятно, что тенденции развития мирового сообщества выдвигают на первый план науку как одну из действенных и эффективных ресурсов экономики. Это связано с тем, что на сегодняшний день рынок высоких технологий по сравнению с рынком сырья занимает лидирующую позицию в условиях рыночной экономики. Становится очевидным, что необходимо отходить от ресурсно-экспортного варианта развития, поскольку он становится менее перспективным.

В связи с этим производство высокотехнологических товаров направлено не только на получение прибыли, оно необходимо также для успешного функционирования предприятий в условиях конкуренции как на внешнем, так и на внутреннем рынках. В сложившихся условиях производство инновационной продукции направлено на поддержание конкурентного преимущества по сравнению с другими предприятиями. Однако процесс создания инноваций требует значительных финансовых затрат. По этой причине остается актуальным вопрос создания механизма инвестирования инновационной деятельности как на уровне государства, так и на местном уровне.

Первоначально следует разобраться, что же такое инвестиции. В действующем законодательстве под *инвестициями* понимают денежные средства, ценные бумаги, иное имущество, в том числе имущественные права, иные права, имеющие денежную оценку, вкладываемые в объекты предпринимательской и (или) иной деятельности в целях получения прибыли и (или) достижения иного полезного эффекта [1].

В федеральном законе «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений» под инвестициями понимаются вложения инвестора в объекты инвестирования.

Вместе с тем, как в отечественной, так и в зарубежной науке разработано большое количество определений «инвестиции».

Так, И. А. Бланк под инвестициями понимает вложение капитала в различных видах форм (денежной, материальной, нематериальной) в объекты предпринимательской деятельности для получения прибыли как в краткосрочном, так и долгосрочном периоде [1].

«Инвестиция», указывает Я. С. Меркулов [2], происходит от латинского слова *investire* – долгосрочное вложение ресурсов для создания и получения прибыли в будущем, которая превысит первоначальную величину и стоимость инвестиций.

Для В. Г. Золотогорова инвестиции – это вложение капитала в различного рода программы, мероприятия, проекты для создания новых, поддержки и развития уже действующих производств, получения прибыли, улучшения технической составляющей производства и других результатов [3].

В узком и широком смысле рассматривают инвестиции И. В. Сергеев, И. И. Веретенникова и В. В. Яновский [4]. В широком смысле они понимают инвестиции как вложение государством, физическими лицами денежных средств, имущественных и интеллектуальных ценностей, направленных на создание новых предприятий, улучшение качества действующих, приобретение ценных бумаг и активов для получения прибыли в будущем либо другого результата.

Для зарубежных ученых инвестиции также имеют различный смысл. Так, для Дж. Кейнса инвестиции – это «...прирост ценности капитального имущества в результате производственной деятельности данного периода, ... та часть дохода за данный период, которая не была использована для потребления, ...покупка отдельным лицом или корпорацией какого-либо имущества, старого или нового, дома или машины, ценных бумаг на фондовой бирже и т. д.» [5, с. 157].

К. Макконел и С. Брю определяют инвестиции как затраты на создание новых заводов, станков, оборудования с длительным сроком службы и т. д. [6].

П. Самуэльсон (*Samuelson*) считает, что инвестиции (или капиталовложения) – накопление капитала страны в течение года в виде зданий,

строений, сооружений, оборудования, машин. Для него осуществление инвестиций направлено на отказ от настоящего потребления накопленных результатов для увеличения потребления в будущем [7].

Таким образом, проанализировав различные определения, можно выделить, на наш взгляд, основные характеристики инвестиций:

- выступают объектом экономического управления, поскольку связаны со сферой экономических отношений, экономической деятельностью;

- связаны с понятием «капитал», одним из древнейших и сложнейших категорий. Капитал считается главным элементом и фактором производства, и его использование направлено на получение прибыли и дополнительных материальных благ. При этом он используется в различных формах. Первоначально капитал выступает в денежной форме, затем трансформируется в производительный (земля, здания, сооружения, земельные участки и др.) и товарный капитал;

- направлены на достижение определенной цели – заранее определенный результат, который может носить как экономический, так и неэкономический характер;

- инвестиции являются одним из объектов рыночных отношений, поскольку в их рамках используют большое количество товаров, ресурсов, инструментов, которые являются объектами купли-продажи, направлены на формирование особого вида рынка – инвестиционного, который, как и любой другой рынок, характеризуется спросом, предложением, ценой и включает определенных субъектов отношений;

- связаны непосредственно с фактором риска. Это объясняется тем, что инвестор при осуществлении инвестиций всегда понимает, что идет на определенный риск. Он осознает, что может получить инвестиционный доход не в полном объеме либо совсем его не получить, а также частично или полностью потерять.

Одним из важнейших составляющих инвестиций является время. Это связано с тем, что инвестиции – это долгосрочное вложение капитала для получения результата в будущем, т. е. при осуществлении инвестиций происходит отказ от потребления в настоящий момент в пользу будущих благ.

Исходя из вышесказанного, инвестиции можно определить как вложение капитала не только в объекты предпринимательской и иной деятельности, но и в различные сферы и отрасли экономики с целью получения прибыли в будущем, а также для достижения экономического и иных результатов, которые тесно связаны с факторами риска и времени.

В настоящее время в мире различают следующие основные виды инвестиций:

- капиталобразующие (инвестиции, направленные в реальные проекты);

- портфельные (инвестиции, направленные в финансовые активы: банковские вклады, ценные бумаги и др.);

– интеллектуальные (инвестиции в научные разработки, ноу-хау, *hi-tech* продукцию и др.).

Инвестиции, как правило, находят свое выражение в инвестиционном проекте. Трактовок данного определения в настоящее время большое количество.

Так, в методических рекомендациях 1994 г. [8] инвестиционным проектом называется система организационных, правовых и расчетно-финансовых документов, предназначенных для осуществления различных действий.

В законе Саратовской области «О гарантиях частных инвестиций в Саратовской области» [9] инвестиционный проект определяется как деятельность, связанная с инвестициями, где основными субъектами являются, с одной стороны, представитель собственника объекта инвестирования, а с другой – частный инвестор, деятельность которых связана с конкретным объектом инвестирования.

Наиболее полно понятие «инвестиционный проект» раскрывается в методических рекомендациях 2000 г. [10]. Инвестиционный проект – это определение экономической целесообразности, сроков и объемов вложений, необходимая проектно-сметная документация, разработанная в соответствии с установленными стандартами и в рамках действующего законодательства.

Инвестиционный проект необходимо рассматривать в нескольких аспектах:

- как процесс, связанный с осуществлением инвестиционной деятельности;
- как систему организационных, правовых, финансовых, расчетных документов, необходимых для осуществления различных действий;
- как деятельность, направленную на достижение определенных целей с использованием комплекса различных действий.

Поскольку в последнее время инвестиционная деятельность осуществляется в виде проектной деятельности, актуальным является рассмотрение вопроса инвестирования данных проектов.

Понятие «инвестирование» можно определить как финансовые и другие материальные и нематериальные вложения в инвестиционные идеи, проекты, выгодные объекты недвижимости, ценные бумаги с целью создания и внедрения новой техники, новых технологий, методов, способов производства. Инвестирование играет важную роль в экономике, поскольку является одним из условий оборота средств, объектов, недвижимости хозяйствующего субъекта. При этом деятельность в сфере производства создает предпосылки для новых инвестиций.

В науке отсутствует единое определение инвестирования. Существуют различные точки зрения ученых и разработано большое количество определений данного понятия.

Например, для зарубежной экономической науки присущ широкий подход к определению инвестиций и процессу инвестирования. Такой же

точки зрения придерживается Ф. С. Тумусов [11]. Он считает, что инвестирование – это процесс создания и приумножения финансов с целью движения и воспроизводства капитала.

Профессор В. М. Серов [12] определяет инвестирование как вложение капитала в различные экономические проекты с целью последующего его (капитала) увеличения.

Согласно методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов и отбору для финансирования 1994 г. [8], существуют следующие формы инвестиций:

- денежные средства и их эквиваленты;
- земельные участки;
- здания, машины, оборудование и др.;
- имущественные права (патенты, товарные знаки, свидетельства на промышленные образцы и др.).

Источниками инвестиций в соответствии с этими же рекомендациями являются:

- собственные финансовые средства, а также иные виды активов и привлеченных средств;
- ассигнования из федерального, регионального и местного бюджетов;
- иностранные инвестиции;
- различные формы заемных средств.

Источники инвестиций в «Методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов» 2000 г. [10] подразделяются на две группы средств:

- образующиеся в ходе осуществления проекта (самофинансирование проекта);
- внешние по отношению к проекту.

В законе Саратовской области [9] инвестиции имеют следующие формы:

- долевое участие;
- строительство зданий, строений, сооружений;
- приобретение в собственность зданий, строений, сооружений, акций, облигаций;
- участие в процессе приватизации государственной и муниципальной собственности;
- приобретение в собственность и аренда земель;
- приобретение иных имущественных прав в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации и Саратовской области.

Однако, проанализировав определения понятия «инвестирование», можно увидеть, что в них отсутствует инновационная направленность.

В сложившихся современных условиях рыночное хозяйство основывается на инновациях и инновационном предпринимательстве. Поэтому, помимо уже существующих типов инвестиций (реальных и капиталобразующих), право на существование имеет еще один тип – «интеллектуаль-

ные инвестиции». В науке их определяют как вложения долгосрочного характера, направленные на поддержание и развитие научного потенциала, на обобщение и использование научного опыта, на подготовку высококвалифицированных специалистов и осуществление иных мероприятий, направленных на обеспечение инновационного воспроизводства капитала. Интеллектуальные инвестиции имеют место быть в связи с тем, что в условиях рыночного хозяйства, свободного предпринимательства и высокой конкуренции особую роль играют инвестиции, направленные на внедрение в производство инноваций. Для того чтобы конкурировать на рынке, необходимо производить товар высшего качества и иметь низкие издержки производства. Это и является стимулом для внедрения новшеств в процесс деятельности предприятия, который не может быть осуществлен без интеллектуальных инвестиций [13].

Впервые термин «инновация» («нововведение») детально был разработан западными учеными в 1930 г.

В Рекомендациях по сбору и анализу данных по инновациям («Руководство Осло») инновации представлены как внедрение в употребление какого-либо нового или значительно улучшенного продукта (товара или услуги), как использование не имеющих аналогов методов маркетинга или организации производства в деловой практике, а также в организации рабочих мест и внешних связей [14].

В Российской Федерации закон «Об инновациях и инновационной деятельности» [15] первой приняла Саратовская область. В указанном законе инновациями называют результаты научной, исследовательской, научно-технической деятельности, которые предоставляют право ее владельцу на использование объектов интеллектуальной собственности, являющихся результатом деятельности, а также право переуступки своих полномочий другому лицу либо отказа от них.

Под научно-исследовательской понимается деятельность, связанная с получением и применением новых знаний, результатом которой является интеллектуальная собственность. Под научно-технической следует понимать деятельность, которая направлена на приобретение новых знаний для решения экономических, технических, социальных и иных задач.

Понятие «инновационная деятельность» дается в ст. 2 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127 «О науке и государственной научно-технической политике» [16], согласно которой инновационная деятельность включает научную, технологическую, организационную, финансовую, коммерческую виды деятельности, направленные на реализацию инновационных проектов, а также на создание инновационной инфраструктуры. Поскольку в законе указанное понятие трактуется широко, необходимо уточнить некоторые термины, раскрывающие его содержание.

Так, научно-исследовательская деятельность представляет собой творческую деятельность, направленную на увеличение полученных знаний, а также на поиск новых областей их применения. Существуют сле-

дующие виды указанной деятельности: фундаментальные исследования, прикладные исследования и разработки. Фундаментальные исследования – это исследования, направленные на получение новых знаний без какой-либо конкретной цели, направленной на использование этих знаний. Прикладные исследования – это работа, направленная на получение новых знаний с целью их применения для решения практических задач.

Инновационная инфраструктура – совокупность организаций, которые с помощью предоставления различных услуг способствуют реализации инновационного проекта.

Исходя из определения инновационной деятельности, мы можем понять, что это процесс, который связан с преобразованием нововведения в продукцию и выведением его на рынок для последующего применения.

Таким образом, становится очевидным, что в результате инновационной деятельности создается не просто продукт, а высокотехнологичная продукция, которая по наукоемкости превышает средний уровень в промышленном производстве [17].

Возвращаясь к вопросу об инновациях, необходимо отметить, что это не любое новшество, а только то, которое в действительности увеличивает результативность и эффективность деятельности. Однако необходимо отметить, что инновации существенно отличаются от изобретений и нововведений. Изобретение связывают с созданием новых технических разработок или усовершенствованием старых, а нововведение – внедрением новых решений. Особенность инновации состоит в том, что она непосредственно связана с внедрением и при этом создает дополнительную ценность объекта.

С позиций инвестирования инноваций больший интерес вызывает процессно-финансовый подход, в рамках которого инновация – это процесс вложения инвестиций в инновации, а именно в разработку новой техники, технологий, научные исследования [17].

Понятие экономической инновации впервые было разработано в начале XX в. австро-американским экономистом Йозефом Шумпетером [18]. Его труды являются исходными для понимания инновационного предпринимательства, под которым он понимает деятельность по созданию и коммерческому использованию технико-технологических нововведений в областях производства продукции или услуг, направленных на организацию нового рынка и удовлетворение новых потребностей.

Инновационное предпринимательство Й. А. Шумпетер [18], главным образом, связывает с крупными фирмами. Однако и малые предприятия оказывают существенное влияние на динамику научно-технического прогресса. Они позволяют в самое короткое время создать значительное количество рабочих мест, расширить налоговую базу, способствуют росту национального дохода и обеспечивают выпуск импортозамещающей продукции.

Сегодня малые и средние предприятия помогают решать многие вопросы, в том числе и текущие социально-экономические проблемы государства, одна из которых – занятость населения. Анализ развития малого и среднего бизнеса в зарубежных странах показывает, что данный субъект играет огромную роль в становлении экономики страны, создавая конкуренцию на рынке и стимулируя крупные предприятия внедрять новые технологии, инновационные разработки. Малые и средние предприятия отличаются повышенной оперативностью, способностью к гибкости в изменяющихся условиях, быстрому созданию инновационных производств, новых рабочих мест. В связи с этим государства стремятся повышать уровень конкурентоспособности малых и средних предприятий, улучшать условия предпринимательской деятельности и на уровне государства поддерживать малый и средний бизнес.

В наиболее развитых зарубежных странах предприятия малого и среднего бизнеса составляют около 60–70% от общего числа предприятий. Развитие малого и среднего бизнеса за рубежом идет более быстрыми темпами, чем в России. Это объясняется кризисным состоянием экономики нашей страны, которое привело к уменьшению научно-технического уровня производства по сравнению с зарубежными странами. Предприятия в преимущественном большинстве перестали работать над перспективными научно-техническими проектами. На первое место вышла заинтересованность в улучшении текущих финансовых результатов.

Однако мировой опыт показывает, что переход к рынку возможен только при условии проведения радикальных хозяйственных реформ и преобразований в базисной структуре экономики. Весьма значительную роль в данном процессе играет инновационное предпринимательство, которое рассматривается как основа современной модели развития.

Сегодня в странах с развитой экономикой поддержка малого и среднего бизнеса имеет большое значение, поскольку является базой для стабильного развития экономики в целом. Материальная поддержка малого предпринимательства в таких странах проявляется в финансово-кредитной, имущественной и ресурсной помощи, ядром которой в западных странах является финансовая поддержка, способствующая координации усилий в этой области государства, государственных органов, крупных предприятий и банков. Государство редко выходит на прямой контакт с малым бизнесом. Основная задача государственных органов за рубежом – поддержка и стимулирование тех рыночных структур, которые непосредственно связаны с малым бизнесом. В основном политика и система поддержки малого предпринимательства в зарубежных странах определяется федеральными властями, а конкретные мероприятия реализуются на уровне регионов. Например, в Испании уже давно действует специальная организация, зани-

маюшаяся вопросами государственной поддержки малого и среднего предпринимательства, которая создана при Министерстве промышленности и энергетики.

Во Франции поддержка малого и среднего предпринимательства является одной из главных задач правительства. Оно совместно с министерствами разрабатывает программы помощи, стимулируя малые и средние предприятия к улучшению производства, введению инноваций. Государственная политика стимулирования включает предоставление налоговых льгот, создание бизнес-инкубаторов, обеспечение доступной системы обучения и повышения квалификации предпринимателей. Свое развитие малое предпринимательство получило во многом благодаря крупным предприятиям, поскольку большим компаниям стало невыгодно производить все самостоятельно и они стали привлекать малые предприятия для производства отдельных элементов. Малое предпринимательство активно проявляется также в сфере сервиса (кафе, небольшие магазины). На сегодняшний день малые предприятия стабильно чувствуют себя на рынке, однако им сложно конкурировать с крупными предприятиями, в связи с чем им необходима государственная поддержка. Во Франции специальные гарантийные фонды помогают поиску источников финансирования вновь создаваемым предприятиям. Этому содействуют специальные банки, которые занимаются кредитованием закупок оборудования, предоставлением займов на выгодных условиях и др. Французское законодательство о налогах предусматривает применение режима упрощенного налогообложения.

В Германии малое предпринимательство имеет свою историю, специфику развития и важное экономическое значение для государства. На территории страны действуют специальные программы, способствующие развитию малого бизнеса путем предоставления долгосрочных кредитов на 20 лет, при этом два первых года проценты не взимаются, а оплата кредита и график погашения задолженности начинается через 10 лет после выдачи кредита. С момента появления первых крупных предпринимателей стали создаваться торгово-промышленные палаты, которые в настоящее время развились до уровня государственных органов. Ни один акт, касающийся малого предпринимательства, не обходится без одобрения, согласования и утверждения палаты. Программы содействия развитию малого предпринимательства в Германии, как и в других зарубежных странах, направлены на поддержку наукоемких отраслей производства. Льготное кредитование включает в себя следующие направления: кредитование малых и средних предприятий, направленных на инновационную деятельность; кредитование проектов по охране окружающей среды и др.

Таким образом, в условиях перехода экономики на путь инновационного развития совершенствование малого предпринимательства становится важнейшей задачей, так как без него невозможно обеспечить успешное социально-экономическое развитие государства.

На сегодняшний момент уровень развития малого предпринимательства в Российской Федерации невысок по сравнению с другими странами. Так, например, на 1000 жителей России приходится 6–7 малых предприятий, за рубежом – 25–30 (США, Япония). В развитых государствах малый бизнес создает более 80 % рабочих мест, в России же – не более 20%.

В Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. [19] было обозначено, что к 2020 г. на территории России должна быть создана такая экономика, которая позволит конкурировать с развитыми странами по уровню знаний и высоких технологий. Необходимо также провести мероприятия, направленные на создание условий для массового внедрения инноваций во всех секторах экономики, и в первую очередь в сфере экономики знаний.

Это возможно только при условии активного государственного регулирования предпринимательской деятельности. Одним из таких видов регулирования является государственная поддержка субъектов, играющих существенную роль в экономике страны и имеющих наиболее уязвимые позиции на рынке, а именно субъектов малого предпринимательства.

Отвечая на вопросы во время пресс-конференции, состоявшейся 18 декабря 2014 г., Президент В. В. Путин [20] отметил, что на сегодняшний день внешние условия заставляют переходить на инновационные пути развития. Для этого необходимо создать благоприятные условия для ведения предпринимательства, обеспечить его свободу. По словам президента, все это уже проводится в России. Конкретные же мероприятия были им изложены в Послании к Федеральному Собранию РФ 4 декабря 2014 г.

В. В. Путин также указал на необходимость поддержки малого и среднего предпринимательства. Он предложил для малых предприятий, которые не были замечены в серьезных нарушениях в течение последних 3 лет и приобрели хорошую репутацию, в течение последующих 3 лет не проводить плановых проверок в рамках государственного и муниципального контроля. Президент указал на необходимость законодательного решения вопросов предпринимательства. Что касается «открывающихся» малых предприятий, то им должны предоставляться двухлетние налоговые каникулы, а предприятиям, начинающим с нуля, – полное освобождение от налогов.

Субъектами малого и среднего предпринимательства являются:

– физические лица (граждане РФ, иностранные граждане), которые обладают исключительными правами на объекты инновационной деятельности и реализуют на практике созданные ими инновации;

– юридические лица (предприятия, организации, учреждения), имеющие исключительное право на объекты инновационной деятельности и реализующие инновации на практике;

– физические и юридические лица, осуществляющие поддержку инновационной деятельности (правовую, финансовую, маркетинговую, рекламную, лизинговую и др.);

– юридическое лицо, осуществляющее в соответствии с законодательством Российской Федерации вне зависимости от организационно-правовой формы и формы собственности инновационную, научную и научно-техническую деятельность и действующее в соответствии с учредительными документами.

В последнее время одним из перспективнейших субъектов инновационной деятельности становится также учебно-научно-инновационный комплекс – высшее учебное заведение всех форм собственности, вне зависимости от отраслевой направленности, имеющее статус юридического лица либо ассоциации юридических лиц, прошедшее аттестацию и государственную аккредитацию, занимающееся реализацией образовательных программ, ведущее научные исследования и научно-техническую деятельность, направленную на социально-экономическое и духовное развитие общества, региона и страны в целом.

Специальными субъектами малого и среднего предпринимательства являются государственные и муниципальные фонды поддержки, организации по содействию кредитования, акционерные инвестиционные компании. В последнее время в инфраструктуру малого бизнеса входят микрофинансовые организации.

В рамках рассматриваемой темы актуальным является рассмотрение вопроса о малом инновационном предприятии – специальном субъекте инновационной деятельности, создаваемом с целью мелкосерийного производства инновационной продукции.

При оценке потенциала малого предпринимательства необходимо учитывать, что ему присущи следующие характеристики:

- приспособляемость к изменяющимся условиям, мобильность, лояльность, при этом глава фирмы зачастую является автором нововведения, новшества;
- разносторонний характер мотивации к инновациям, который обуславливается как экономическими, так и внешнеэкономическими факторами;
- творческий потенциал;
- ориентация на конечный результат в целях получения прибыли;
- рискованность;
- быстрая реакция на спрос;
- высокий уровень производительности труда и малые издержки производства;
- высокая отдача на единицу денежных средств, вложенных в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы [21–23].

Малые предприятия в инновациях, с одной стороны, способствуют развитию инновационных процессов в экономике, совершенствуя производство и управление, а с другой – являются непосредственными участниками процесса производства наукоемкой продукции, порождая спрос на новейшие разработки, обеспечивая, тем самым, непрерывный прогресс.

Малые предприятия эффективны не только в потребительской сфере, но и как производители отдельных узлов и механизмов, выпуск которых невыгоден для крупных предприятий, но необходим для производства конечной продукции.

Однако в настоящее время высокий потенциал инновационных разработок используется малыми предприятиями недостаточно широко, поскольку система их государственной поддержки является несовершенной как на государственном, так и на региональном уровне. В связи с этим остановимся более подробно на вопросе инвестирования инновационной деятельности малых предприятий.

Основными источниками инвестирования инновационной деятельности в России являются:

- *бюджетные средства* (федеральный, субъектов Федерации и местный);
- *внебюджетные средства* (инвесторов, собственные средства организаций, осуществляющих инновационную деятельность).

Переход на рыночные отношения характеризуется самостоятельностью предприятий. Они сами решают, что и за счет чего производить, а также сами определяют источники, структуру и способы привлечения внебюджетных средств. Но это вовсе не означает, что государство полностью игнорирует бизнес и не принимает никакого участия в развитии инвестиционно-инновационной сферы. Инвестирование инновационной деятельности из средств бюджета государства осуществляется в соответствии с государственной инновационной политикой, направлено на решение крупных технических проблем и поддержку малого и среднего инновационного бизнеса.

Необходимость государственного регулирования инновационных процессов объясняется их возрастающим значением для всей экономики в целом. Государство осуществляет регулирование инновационных процессов как непосредственно, подталкивая на создание и внедрение инноваций, так и опосредованно, создавая соответствующий механизм.

Формы государственной поддержки многообразны, к ним относятся:

- прямое бюджетное финансирование;
- инвестирование средств в создание и развитие субъектов инфраструктуры инновационной деятельности;
- предоставление индивидуальным изобретателям и малым предприятиям беспроцентных банковских ссуд;
- создание венчурных инновационных фондов, пользующихся значительными налоговыми льготами;
- снижение государственных патентных пошлин для индивидуальных изобретателей;
- создание сети технополисов, технопарков и т. д.

Государственное регулирование инвестиционной и инновационной сфер экономики является одним из главных условий функционирования экономики в рамках рыночных отношений [24–26]. Как указывалось выше,

инновационную деятельность предприятие может вести как за счет собственных средств, так и за и за счет внешних источников. Инвестирование инновационной деятельности осуществляется и за счет внебюджетных средств, а именно инвесторов, и проявляется в следующих формах:

- инвестиции в ценные бумаги (акции, облигации, векселя);
- прямые вложения в денежной форме, осуществляемые в виде ценных бумаг,
- инвестиции в промышленную и интеллектуальную собственность, осуществляемые на основе заключения партнерских соглашений о совместном ведении инновационной деятельности;
- предоставление лизинга и других способов привлечения инвестиций.

Одним из методов инвестирования инновационной деятельности является венчурное инвестирование [27], которое получило особое распространение среди малых и средних инновационных предприятий. Это объясняется отсутствием предоставления предприятием какого-либо залога либо залога в отличие от банковского кредитования. Как правило, при венчурном инвестировании инвестор не старается приобрести основной и контрольный пакет акций инвестируемой компании, что в значительной степени отличает его от стратегического инвестора или партнера.

Малый бизнес [28] – почва для возникновения венчурного инвестирования. Этот вид инвестирования связан с элементом риска. Он является практически единственным источником финансовой поддержки малых инновационных предприятий, при этом он обеспечивает не только устойчивое развитие экономики страны в целом, но и высокую прибыль инвесторам.

Венчурные инвестиции – это долгосрочные, от 3 до 7 лет, высокорисковые инвестиции частного капитала в капитал начинающих малых высокотехнологичных и перспективных предприятий с целью получения прибыли от прироста стоимости вложенных средств в будущем.

В настоящий момент усиливается роль государства в развитии инфраструктуры и поддержке малых инновационных компаний. Основной интерес государства в продвижении венчурного финансирования состоит в том, что венчурный капитал решает сразу две задачи: поддерживает развитие инновационного сектора экономики и внедряет инновационные технологии в производственные процессы страны, а переход к экономике, основанной на производстве интеллектуального капитала, является приоритетом для государства.

Несмотря на то что венчурное финансирование инновационной деятельности очень специфично, в последние годы отечественный венчурный капитал значительно увеличился в связи с недостаточным развитием российского фондового рынка.

Анализируя состояние венчурного финансирования в экономике России, можно заметить, что хотя в последние годы и увеличивается объем венчурного капитала, существуют факторы, которые ограничивают развитие венчурного предпринимательства в России. К таковым относятся:

– несовершенство действующего законодательства, которое не стимулирует учреждение венчурных фондов в Российской Федерации, практически отсутствуют нормативные правовые акты, обеспечивающие функционирование венчурного финансирования малого инновационного бизнеса;

– отсутствие приоритета на развитие малого и среднего бизнеса;

– недостаток отечественных инвестиционных ресурсов (российские банки, пенсионные фонды, страховые организации не участвуют в работе венчурных компаний) и, как следствие, слабое формирование российского инвестиционного портфеля;

– использование по большей части иностранного венчурного капитала при минимальном участии российского капитала;

– нецелевое использование средств венчурных фондов;

– неразвитость инфраструктуры, способной обеспечить эффективное сотрудничество субъектов венчурной индустрии и малых инновационных фирм;

– отсутствие экономических стимулов для привлечения прямых инвестиций в предприятия высокотехнологического сектора, обеспечивающих приемлемый риск для венчурных инвесторов;

– отсутствие гибкой системы налогообложения венчурного бизнеса;

– отсутствие квалифицированного менеджмента, недостаточное количество квалифицированных управляющих венчурными фондами.

Государственная поддержка венчурного предпринимательства в России должна проводиться по следующим направлениям:

– нормативное регулирование научной, технической, инновационной и венчурной деятельности;

– решение правовых проблем интеллектуальной собственности, системы льгот и мотивации труда;

– создание и поддержка экономических условий и стимулов развития венчурного предпринимательства посредством увеличения объемов госзаказа;

– формирование организационно-управленческих условий венчурной индустрии посредством совершенствования управления государственной собственностью.

Все вышеперечисленные меры должны осуществляться в соответствии со стратегией государственной политики в области венчурного бизнеса, внедренной в единую концепцию развития инновационной и инвестиционной деятельности. Государству необходимо содействовать благоприятному функционированию венчурного капитала, в том числе венчурных фондов, что окажет влияние на развитие венчурного предпринимательства и заложит необходимый фундамент для перехода к инновационной экономике.

Стимулирование роста высокотехнологических секторов в Российской Федерации может быть более успешным в случае участия государства в венчурных инвестициях в отличие от прямых государственных инвестиций [29–32].

Подводя итог, следует отметить, что венчурное финансирование является механизмом, который обеспечивает инновационное развитие экономики государства. Для решения основных проблем венчурного предпринимательства необходима активная государственная политика, направленная на создание благоприятных условий и инфраструктуры для реализации инноваций. В этой связи нужен комплексный подход к определению основных путей решения проблем, связанных с инвестированием инновационной деятельности малых предприятий, а также к созданию благоприятных условий для их развития.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бланк И. А.* Управление инвестициями предприятия. М. : Ника-Центр, Эльга, 2003. 480 с.
2. *Меркулов Я. С.* Инвестиции : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2010. 420 с.
3. *Золотогоров В. Г.* Инвестиционное проектирование. Минск : ИП «Экоперспектива», 1998. 463 с.
4. *Сергеев И. В., Веретенникова И. И., Яновский В. В.* Организация и финансирование инвестиций. М. : Финансы и статистика, 2002. 400 с.
5. *Кейнс Дж. М.* Общая теория занятости, процента и денег. М. : Эксмо, 2007. 960 с.
6. *Макконел К. Р., Брю С. Л.* Экономикс. М. : ИНФРА-М, 2003. 983 с.
7. *Samuelson P. A.* Economics : An Introductory Analysis. N. Y. : McGraw-Hill, 1948. 861 p. Рус. пер. см. : *Самуэльсон П.* Экономика : вводный курс. М. : Экономика, 1964. 843 с.
8. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и отбору для финансирования. URL : [http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie\\_rekomendaciiMeto.html](http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie_rekomendaciiMeto.html) (дата обращения : 28.12.2014).
9. О гарантиях частных инвестиций в Саратовской области. URL : <http://pravo.levonevsky.org/bazazru/texts22/txt22482.htm> (дата обращения : 28.12.2014).
10. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). Официальное издание. М. : Экономика, 2000. 421 с.
11. *Тумусов Ф. С.* Инвестиционный потенциал региона : теория, проблемы, практика. М. : Экономика, 1999. 272 с.
12. *Серов В. М.* Инвестиционный менеджмент : учеб. пособие. М. : ИНФРА, 2000. 272 с. URL : <http://economy-lib.com/investirovanie-osnovnogo-kapitala-agropromyshlennogo-kompleksa-na-osnove-sovershenstvovaniya-tsenoobrazovaniya-v-usloviya#ixzz3NAnGCpHX> (дата обращения : 28.12.2014).
13. *Плотников А. Н.* Организационно-экономический механизм инвестирования инновационной деятельности : теория и методология : дис. ... д-ра экон. наук. Самара : Самарская государственная экономическая академия, 2003. 368 с. URL : <http://www.dissercat.com/content/organizatsionno-ekonomicheskii-mekhanizm-investirovaniya-innovatsionnoi-deyatelnosti-teoriya#ixzz3NAovf6F9> (дата обращения : 28.12.2014).
14. Руководство Осло – Рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. Совместная публикация ОЭСР и Евростата. Третье издание. М., 2010. 107 с. URL : <http://www.twirpx.com/file/568260/> (дата обращения : 28.12.2014).

15. Закон Саратовской области «Об инновациях и инновационной деятельности» от 28 июля 1997 г. № 50-ЗСО URL : <http://www.saratov.gov.ru/government/structure/mininv/regzakon1/detail.php?ID=16051> (дата обращения : 28.12.2014).
16. Федеральный закон от 23.08.1996 № 127-ФЗ (ред. от 02.11.2013) «О науке и государственной научно-технической политике». URL : [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_149218/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_149218/) (дата обращения : 28.12.2014).
17. *Плотников Д. А.* Инвестирование наукоемких предприятий университетских комплексов на основе логического подхода. Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2010. 148 с.
18. *Шумпетер Й. А.* Теория экономического развития. Капитализм, социализм и демократия. М : Эксмо, 2007. 401 с.
19. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. URL : [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_90601/?frame=1](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90601/?frame=1) (дата обращения : 28.12.2014).
20. Большая пресс-конференция Владимира Путина. 18 декабря 2014 г., Москва. URL : <http://kremlin.ru/transcripts/47250> (дата обращения : 28.12.2014).
21. *Морозов В. А.* Большая забота о малом бизнесе : зарубежный опыт поддержки малого предпринимательства // Российское предпринимательство. 2007. № 8. С. 37–39.
22. *Андреева Л. В., Андреева Т. А., Апрецова Н. Г.* Малое и среднее предпринимательство. М. : Проспект, 2014. 460 с.
23. *Ефимцева Т. В.* Правовое положение малых инновационных предприятий : проблемы определения и закрепления // Предпринимательское право. Приложение «Бизнес и право в России и за рубежом». 2013. № 2. С. 28–31.
24. *Шугуров М. В.* Мировая финансовая система и инновационное развитие : международно-правовые аспекты // Финансовое право. 2012. № 7. С. 11–16.
25. *Гордашников О. Ю.* Современные проблемы экономики и управления инновациями. Саратов : КУБиК, 2013. 326 с.
26. *Коканов Б. А.* Источники правового регулирования инновационной деятельности // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Экономика и право. 2011. Вып. 4. С. 119–126.
27. *Илларионов Н. В.* Система гарантий в механизме правового регулирования венчурных инвестиционных отношений // Российская юстиция. 2013. № 9. С. 10–13.
28. *Загоруйко И. Ю., Фролович Э. М.* Исследование развития и оптимизации малого предпринимательства в России в условиях мирового кризиса // Вестн. Перм. ун-та. 2012. № 3. С. 107–113.
29. *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.
30. *Плотников А. Н.* Источники инвестирования инноваций на предприятии // Инновационная деятельность. 2013. № 1 (24). С. 81–84.
31. *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.
32. *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.

## ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

**Р. Р. Вьюнова**

Саратовский государственный технический университет  
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77  
E-mail: Vjunchik\_@mail.ru

На современном этапе развития экономики разработка концепции проектного управления имеет принципиальное значение для успешной реализации инновационного проекта. В статье рассматривается концепция проектного управления, с помощью которой планируется и выполняется единая комплексная программа работ для достижения четких целей проекта.

*Ключевые слова:* концепция проектного управления, инновационный проект, инновационная деятельность, экспертиза инновационных проектов.

### **Application of Concept of Project Management in Innovation**

**R. R. Vyunova**

At the present stage of development of economy development of the concept of project management is essential for the successful implementation of the innovative project. The article discusses the concept of project management through which planned and executed a single integrated program of work to achieve clear objectives for the project.

*Key words:* the concept of project management, innovative design, innovation, expertise and innovative projects.

На современном этапе экономического развития инновационная деятельность характеризуется широким применением концепции проектного управления (*Project Management*). Суть этой концепции заключается в целевом инвестировании в реальные активы, реализация которых связана с затратой времени и денежных средств. Процесс изменений, осуществляемых по определенным правилам в рамках установленного бюджета и временных ограничений, представляет собой управление проектами (проектное управление).

При проектном управлении вся совокупность работ в рамках инновационного цикла планируется и выполняется как единая комплексная программа, реализуемая специально созданной группой исполнителей, использующих централизацию управления. Руководители проекта принимают решения, передают соответствующие принятым решениям команды и осуществляют контроль за их реализацией.

Основные компоненты концепции представлены на рисунке.

Инновационный проект – комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленных на создание и распространение нового вида продукции или технологии [1].

Важной особенностью инновационного проекта и концепции проектного управления является их целевая направленность на получение конеч-

ного результата (часто коммерческого) с учетом возможных рисков и в условиях жестких рамок налагаемых ограничений по срокам его реализации и бюджету.



Схема концепции проектного управления [1]

Концепция проектного управления основана на использовании ряда организационных принципов, которые представлены в табл 1.

Таблица 1

### Принципы проектного управления

Принцип	Характеристика
Селективное управление	Поддержка проектов по приоритетным направлениям развития науки и техники
Целевая ориентация проектов на обеспечение конечных целей	Установление взаимосвязей между потребностями в создании инноваций и возможностями их осуществления
Полнота цикла управления проектами	Реализация полного цикла процесса управления, предполагающего всю совокупность решений от выявления потребностей до управления передачей полученных результатов
Поэтапность инновационных процессов и процессов управления проектами	Описание полного цикла каждого этапа формирования и реализации проекта
Иерархичность организации инновационных процессов и процессов управления ими	Представление процессов с разной степенью детальности, соответствующей определенному уровню иерархии. Все уровни деятельности соотносятся друг с другом так, что нижестоящий уровень подчиняется вышестоящему, а состояния (принимаемые решения, цели, промежуточные и конечные результаты) процесса на вышестоящем уровне обязательны при определении состояний на нижестоящем

Принцип	Характеристика
Многовариантность при выработке управленческих решений	Учет в ходе управления инновационными процессами воздействия неопределенных факторов. Для снижения степени неопределенности необходим переход к многовариантной подготовке альтернативных решений о выборе состава конечных целей проектов, альтернативных способов их достижения, вариантов комплексного обеспечения работ, учитывая разные составы исполнителей, стоимость и длительность выполнения работ, материально-технические ресурсы и условия стимулирования исполнителей
Системность	Разработка совокупности мер, необходимых для реализации проекта (организационно-экономических, технологических, законодательных, административных и т. д.), во взаимосвязи с концепцией развития страны в целом
Комплексность	Разработка отдельных увязанных между собой элементов проектной структуры, обеспечивающих достижение подцелей, в соответствии с генеральной (общей) целью того или иного проекта
Обеспеченность (сбалансированность)	Обеспечение всех мероприятий, предусмотренных в проекте, различными видами необходимых для его реализации ресурсов: финансовыми, информационными, материальными, трудовыми

Принципы концепции проектного управления предусматривают проведение детального анализа внутренних и внешних условий реализации проекта, рисков и выработки проектного мышления у команды, реализующей инновационный проект, планирование проектных работ, осуществляемых руководителем проекта и лицами, ответственными за выполнение его отдельных этапов.

Инновационный проект, представляя собой комплексное понятие, включает:

- форму целевого управления инновационной деятельностью, т. е. сложную систему взаимообусловленных и взаимосвязанных по ресурсам, срокам и исполнителям мероприятий, ориентированных на достижение конкретных целей приоритетных направлений развития науки и техники;

- процесс осуществления инноваций, т. е. совокупность выполняемых в определенной последовательности научных, технологических, производственных, организационных, финансовых и коммерческих мероприятий, в результате которых создается инновационный продукт;

- комплект определенных документов – это комплект технической, организационно-плановой и расчетно-финансовой документации, необходимой для реализации целей проекта.

На каждом конкретном этапе разработки инновационного проекта при приближении к конечному результату значение частных целей (сроки, затраты, качество) существенно возрастает [2].

Отсутствие возможности точно оценить конечный результат приводит к применению затратных способов решения задач. На завершающей стадии реализации проекта его неопределенность снижается до приемлемого уровня и дальнейшая вариативность целей инновации становится связана в основном с факторами внешней рыночной неопределенности.

Многообразие возможных целей и задач научно-технического и социально-экономического развития строительного предприятия предопределяет широкое разнообразие видов инновационных проектов (табл. 2).

Таблица 2

**Виды инновационных проектов**

Классификация	Характеристика
По уровню решения	<ul style="list-style-type: none"> <li>– федеральные;</li> <li>– президентские;</li> <li>– региональные;</li> <li>– отраслевые;</li> <li>– отдельного предприятия</li> </ul>
По характеру целей проекта	<ul style="list-style-type: none"> <li>– конечные по достигаемым результатам;</li> <li>– промежуточные, связанные с достижением промежуточных результатов при решении сложных проблем</li> </ul>
По виду потребности	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ориентированные на существующие потребности;</li> <li>– ориентированные на создание новых потребностей</li> </ul>
По типу инновации	<ul style="list-style-type: none"> <li>– введение нового или усовершенствованного изделия, создание нового рынка; освоение нового источника сырья, реорганизация устаревшей структуры управления</li> </ul>
По периоду реализации	<ul style="list-style-type: none"> <li>– долгосрочные (более 5 лет);</li> <li>– среднесрочные (от 3 до 5 лет);</li> <li>– краткосрочные (менее 3 лет)</li> </ul>

В зависимости от вида, сложности и стоимости инновационного проекта в его реализации могут принимать участие как одна, так и несколько строительных организаций. Каждый из участников проекта принимает на себя обязательства по выполнению конкретных функций и несет определенную ответственность за судьбу проекта. Крупные инновационные проекты в строительной организации характеризуются расширенным составом участников: заказчик, проектировщик, руководитель проекта, команда проекта, инвестор, поставщик.

Инновационный проект, рассматриваемый как процесс, совершающийся во времени, включает совокупность последовательных стадий:

- формирование инновационной идеи – зарождение инновационной идеи, формулирование конечной цели, количественная оценка проекта по

объемам, срокам и размерам прибыли, определение путей достижения целей, величины, источников и форм инвестирования;

- разработка проекта – поиск решений по достижению его конечных целей, сравнительный анализ различных вариантов достижения целей и выбор наиболее жизнеспособного для реализации, разработка плана реализации, формирование команды с оформлением при необходимости контрактной документации;

- реализация проекта – выполнение работ по реализации поставленных целей, контроль выполнения календарных планов и расходования ресурсов, корректировка возникших отклонений, оперативное регулирование хода реализации;

- завершение проекта – сдача результатов заказчику и закрытие договоров.

Для обеспечения эффективного управления проектом американские исследователи выделяют ряд важных моментов, которые должны быть реализованы в ходе подготовки проекта:

- понимание на всех уровнях руководства организационной сути проектного управления;

- поддержка проекта высшим руководством организации;

- способность подразделений и служб организации адаптироваться к работе в условиях проектного управления;

- соответствие руководителя проекта критериям отбора: четкая ориентация на получение конкретных результатов к определенному сроку, полное понимание корпоративных целей, стремление внести личный вклад в их достижение, навыки работы с людьми;

- наличие у руководителя качеств полного лидера: авторитетность, ответственность, умение налаживать и поддерживать деловые контакты.

Инновационные проекты играют важную роль при формировании инновационного потенциала предприятия. При этом большое значение имеет система финансовой поддержки инновационных проектов, цель которой состоит в оказании содействия перехода предприятий на инновационный путь развития [3].

Инновационные проекты должны проходить экспертизу, задачей которой является оценка научно-технического, технико-экономического и экологического уровня проекта. При этом предусмотрена ответственность экспертов за подготавливаемые заключения (при одновременной высокой материальной заинтересованности экспертов в положительных результатах реализации проекта) [4]. В настоящее время экспертиза инновационных проектов производится на рейтинговой основе [5]. Экспертная оценка дается на основе анализа научного содержания проекта и научного потенциала автора (авторского коллектива).

Индивидуальный рейтинг проекта рассчитывается по формуле

$$R = r_1 + r_2 + r_3,$$

где  $R$  – общий рейтинг проекта;  $r_1, r_2$  – координаты, учитывающие соответственно научную ценность проекта и реальность выполнения проекта в срок;  $r_3$  – коэффициент коррекции суммарной оценки  $r_1$  и  $r_2$ .

Наиболее распространенной является экспертная система оценки вариантов инновационных проектов, которая производится по следующей методике:

- определение факторов, которые могут в значительной степени повлиять на реализацию проекта;
- расположение факторов в порядке убывания приоритетности;
- оценка весомости (ранжирования) каждого из оставшихся факторов;
- оценка проекта по каждому из критериев (факторов), максимальный балл для любого фактора 100, минимальный 0;
- оценка влияния каждого фактора, полученная перемножением веса (ранга) и оценки этого фактора для каждого из вариантов проектов.
- интегральная оценка приоритетности вариантов инновационных проектов – определяется как сумма оценок проекта по каждому варианту.

В настоящее время получили распространение следующие пакеты прикладных программ для оценки инновационных проектов:

– пакет *COMFAR (Computer Model for Feasibility Analysis and Reporting)*, прошедший международную сертификацию. Оценка коммерческой эффективности производится на основании имитации потока реальных денег;

– пакет «Альт-Инвест», который создан с использованием электронных таблиц *MS Works или Exel 4* и может работать в среде других распространенных табличных процессоров;

– пакет «*Project Expert*», который, как и *COMFAR*, представляет собой «закрытый» пакет;

– пакет «ТЭО-Инвест», базирующийся на методике ЮНИДО и предназначенный для разработки бизнес-планов предприятий любой формы собственности. Методика ЮНИДО играет роль единой базы, некоего универсального языка, позволяющего общаться между собой специалистам в области инвестиционного проектирования, финансового анализа, менеджерам компаний из различных стран мира.

Проектное управление позволяет экономить ресурсы, добиваться высоких темпов роста в бизнесе, снижать издержки производства и повышать конкурентоспособность товаров и услуг [6, 7]. Иными словами, использование проектного управления обеспечивает:

- оценку рентабельности проекта;
- планирование и расчет объемов работ по проектам, их стоимость;
- учет количества измеряемых привлеченных ресурсов, участников и структурных подразделений;
- организацию всех работ по проекту;
- расчет бюджета проекта;
- контроль сроков и качества реализации проекта;

Практика показывает, что проектное управление давно нашло успешное применение по всему миру [8]. Концепция проектного управления позволяет добиться абсолютной прозрачности и управляемости процессом, четкого распределения персональной ответственности и измеримого конечного результата на заранее спланированную дату. При грамотном управлении имеющимися ресурсами представляется возможным улучшение конкурентного положения как на внутреннем, так и на внешнем рынках вне зависимости от масштабов предприятия.

*Работа выполнена под научным руководством д-ра экон. наук, профессора А. Н. Плотникова.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балдин К. В. Антикризисное управление : учеб. пособие. М. : Гардарики, 2005. 271 с.
2. Альтудов Ю. К., Кетова П. П. Созидательный потенциал инновационных факторов развития экономики Юга России // Социально-гуманитарные знания. 2002. № 25. С. 27–29
3. Афонин И. В. Инновационный менеджмент : учеб. пособие. М. : Гардарики, 2005. 224 с.
4. Денисов Г. А., Каменецкий М. И. Инновационная деятельность в строительном комплексе : организационно-экономический аспект // Экономика строительства. 2004. № 7. С. 25–31
5. Плотников Д. А., Щипкова А. Э. Управление инвестиционным проектом в социальной сфере // Проблемы современной экономики : инвестиции, инновации, логистика, труд : сб. науч. тр. Вып. 5. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. С. 231–233.
6. Плотников А. Н., Акчурин А. И. Проектный анализ и композиция системы управления инновационно-инвестиционными проектами в жилищном строительстве // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. 2014. № 1(01). С. 25–38.
7. Плотников А. Н., Иванюков Э. Б. Процессный подход к управлению предприятием и его инвестиционно-инновационной деятельностью // Вестн. СГТУ. 2011. № 4, вып. 1. С. 298–300.
8. Савченко Е. С. Проектное управление. URL : <http://www.dkp31.ru/project> (дата обращения : 02.03.2015).

УДК 338.984

#### МОДЕЛИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

**М. А. Ляшенко**

Московская международная высшая школа бизнеса  
Россия, 109147, Москва, Марксистская, 34, корп. 7  
E-mail: [lyashenkomari@gmail.com](mailto:lyashenkomari@gmail.com)

В статье рассматриваются общие положения и характеристики компонентов моделей стратегического управления деятельностью центров обработки данных, а также перспективы каждой модели.

*Ключевые слова:* деятельность, компонент, модель, стратегия, управление, стратегический менеджмент, перспектива, центр обработки данных.

## Models of Strategic Management Activity Data Centers

M. A. Lyashenko

The article discusses the rationale and characteristics of model components of the strategic management of data centers, as well as the prospects of each model are defined.

*Key words:* activity, component model. strategy, management, strategic management, prospect data center.

В основе современной модели стратегического управления деятельностью центров обработки данных (ЦОД, *data*-центр или Data center) лежат две актуальные для сегодняшнего дня тенденции развития отрасли: консолидация и виртуализация [1, 2].

Рассматривая современное состояние ЦОД, необходимо отметить, что наиболее часто основой определения стратегической модели управления центрами обработки данных выступают технологические характеристики и условия, среди которых ведущими являются конструктивные особенности и параметры оптимизации оборудования, а также программного обеспечения. Экономические условия и параметры центров обработки данных в этом случае воспринимаются как своего рода среда, которая, безусловно, оказывает воздействие на стратегическое управление ЦОД, но проявляется в наиболее общем плане определения направлений развития.

Именно на таких основаниях сегодня сформировано большинство стратегических моделей центров обработки данных ведущих интернет-компаний. В настоящее время аналогичная тенденция наблюдается и среди крупных предприятий, и органов государственной власти, следует отметить, что это мировая тенденция. Все чаще и чаще предпринимаются амбициозные проекты постройки очень крупных ЦОД, которые призваны сконцентрировать как собственные базы данных и другие информационные ресурсы, так и всех, или, по меньшей мере, большинства их филиалов, дочерних предприятий и контрагентов. В этих центрах концентрируются основные информационные услуги от виртуального хостинга до колокации оборудования, которые, как показывает практика, оказывают прямое и существенное влияние на определение стратегии развития ЦОД и формирование модели управления.

В этих условиях происходящие в последнее время, и особенно сегодня, именно экономические, а не технологические или конструктивные изменения привели к перевороту в понимании значения ЦОД. Наиболее ярко это проявилось на примере трех крупнейших мировых центров обработки данных – Google, Microsoft и Yahoo, – представляющих собой на сегодняшний день мегапроекты с огромным количеством технологических новшеств и резервов для модернизации, заложенных в них конструктивно. Наряду с этим сегодня практически решены вопросы обеспечения бесперебойного электропитания для работы *data*-центров в экстренных условиях, повышения эффективности системы охлаждения и обеспечения безопасности и защиты от несанкционированных проникновений. Поэтому основной

частью разработки стратегии развития ЦОД сегодня является именно экономическая составляющая. Важность экономической составляющей определяется еще и тем, что при решении вопроса о размещении на той или иной территории центра обработки данных руководствуются комплексом показателей, таких как удаленность от предполагаемых источников стихийных бедствий и катастроф, возможность проведения до центра оптоволоконных сетей [3, 4]. В этих условиях центры обработки данных становятся еще одним источником экономического развития территории, на которой они расположены, предоставляя рабочие места обслуживающему персоналу, активизируя энергосистему территории и т. п.

Переходя к рассмотрению обозначенных выше тенденций, необходимо отметить, что первая из них – *консолидация* – обусловлена непосредственно двумя ведущими процессами.

Это, во-первых, поглощение мелких организаций более крупными. Наиболее ярко это проявилось в политике таких мощных участников рынка *data*-центров, как *Intel* и *HP*. Они предложили комплексную программу присоединения более мелких организаций, в которой открытая и прозрачная организационно-правовая архитектура процесса присоединения совмещалась с возможностями использования инновационного дизайна информационного центра, обеспечивавшего комфортное объединение информационных центров.

Во-вторых, амбициозные проекты ряда государственных органов и частных компаний по созданию так называемого «публичного облака» (*public cloud*), т. е. комплекса информационно-вычислительных ресурсов, информационных систем, программных продуктов и сервисов, размещенных на ИКТ-инфраструктуре «облачного» оператора и предоставляемых конечным потребителям как «услуга» по их запросу. В таких условиях «облачный» оператор гарантирует высокую доступность, производительность, целостность и сохранность данных клиента.

Рассматривая виртуализацию как ключевую тенденцию стратегии развития *data*-центров, необходимо отметить, что ее значение трудно переоценить. Безусловно, на формирование и развитие стратегии ЦОД оказали и продолжают оказывать влияние многие факторы и технологии, но на первом месте стоит все же *виртуализация*. Именно она стала основным компонентом такого явления, как «большое облако», которое охватывает сегодня все больше технологических и деловых аспектов. С этими технологическими новшествами ускоряются деловые процессы между экономическими субъектами, что приводит к увеличению потребностей в средствах информационного центра для обеспечения деловой активности.

Наряду с этим операции центра обработки данных осуществляются сегодня в весьма сложной экономической окружающей среде и поэтому необходимо выполнение технических требований по энергопитанию, охлаждению и обеспечению надежности хранения информации. На одном уровне с техническими требованиями сегодня находятся именно экономические показатели качества услуг ЦОД, их доступности, прозрачности и пр. В этих

условиях сегодня существуют различные мнения о традиционной ИТ-среде, в рамках которой существовали центры обработки данных в течение многих лет и которая, естественно, активно меняется под воздействием экономических факторов и критериев, что требует формирования именно экономической стратегии развития ЦОД.

В рамках представленных тенденций в настоящее время сформировались несколько типов *data*-центров, каждому из которых свойственна собственная модель стратегического управления деятельностью, отражающая его специфические черты. При этом необходимо отметить, что на формирование этих моделей равное воздействие оказывают как технологические, так и экономические аспекты современного этапа развития.

Наиболее распространенными типами центров обработки данных сегодня являются следующие:

– *складской тип*. В 2009 г. инженеры Google Урс Хозл и Луис Андрэ Барросо ввели этот термин в своей книге «Центр обработки данных как компьютер: введение в дизайн машин складского типа». Такая формулировка – складской тип центра обработки данных – была предложена ими на основе экономического анализа ситуации, с которой регулярно сталкивается такая крупномасштабная интернет-компания, как Google, занимающаяся предоставлением программного обеспечения миллионам пользователей и системного администрирования большого количества серверов и хранилищ [5];

– *суперкомпьютерный информационный центр*. Суть этой модели состоит в размещении в информационном центре суперкомпьютера, способного производить огромное количество операций ежесекундно. Таким образом, основой функционирования *data*-центра в этой модели становится предоставление услуг доступа к использованию возможностей установленного суперкомпьютера. Услуги по хранению информации имеют в этой модели вторичное, подчиненное значение;

– *центр обработки данных единственного владельца*. Представляет собой модель, в рамках которой информационный центр находится в собственности, управляется и используется в подавляющем большинстве случаев единственным владельцем, обеспечивает его собственные потребности и нужды. На зарубежном рынке эта категория центров обработки данных может представлять собой и небольшую серверную комнату, обеспечивающую деятельность индивидуального предпринимателя или малого бизнеса, и большой зал с мегаваттными возможностями, обеспечивающий деятельность предприятия;

– *общественное или частное «облако»*. Сегодня такая форма приобретает все большее распространение наряду с физическими информационными центрами. Непосредственно существуют следующие модели реализации: платформа-обслуживание (*PaaS*), инфраструктура-обслуживание (*IaaS*) или ПО-обслуживание. Для данного типа центров обработки данных сегодня формируются и реализуются гибридные стратегии, где определенные приложения или бизнес-функции – подходящий вариант для использования возможностей «облака»;

– *розничный колокационный (Colocation) центр*. Весьма широкая категория организаций, где их суть колеблется от начального аутсорсинга, услуги которого приобретаются небольшими предприятиями и организациями, вплоть до больших центров с многочисленными серверными стойками и разнообразными IT-услугами, в которых нуждается клиентура;

– *оптово-арендованный центр*. Оптовые соглашения с поставщиками услуг *data*-центра позволяют компаниям арендовать площадь и средства информационного центра, которые управляются и обеспечиваются руководством и персоналом *data*-центра для удовлетворения потребностей оптовых арендаторов.

На современном этапе можно констатировать постепенное формирование новой концепции понимания сущности центра обработки данных, что неизбежно окажет влияние на процесс формирования стратегии. Итак, по современным представлениям время существования единичного *data*-центра в неизменном виде составляет около 10 лет. Именно такой запас жизни несут в себе центры, построенные как ответ на «эру *dotcom*»<sup>1</sup>.

За прошедшее время структура и содержание информационных центров претерпели радикальные преобразования как в аспекте технологий, так и в аспекте инфраструктуры и в огромной степени в аспекте основных операционных положений. Начало нынешнего века привнесло в информационные центры множество новшеств, что расширило бизнес-модели их деятельности и изменило саму суть.

Еще в 2008 г. инженеры Microsoft Кристиан Билэди и Шон Джеймс провели эксперимент. Рассматривая укоренившиеся принципы организации среды информационного центра, они поняли, что необходимо ответить на вопрос о том, почему охлаждение внутренней инфраструктуры крайне важно для функционирования ЦОД? Для эксперимента они взяли стойку серверов и поместили ее в палатку на топливной площадке компании в одном из информационных центров. В результате эксперимента оказалось, что большую часть года сервер работал с нулевым количеством ошибок [6].

Таким образом, результаты эксперимента показали, что требования по охлаждению оборудования и вентиляции помещений *data*-центра постепенно отходят на второй план, что может привести к формированию нового магистрального направления развития центров обработки данных как мобильных модульных единиц. Это же подтверждается и появлением новых инструментов автоматизации управления, которые становятся стратегическим преимуществом модульного информационного центра, который пу-

---

<sup>1</sup> Подробнее см. : Где сегодня короли «пузыря доткомов» 90-х? URL : <https://insider.pro/ru/article/279/>; Nasdaq приближается к максимуму эры «бума доткомов». URL : <http://smart-lab.ru/blog/199236.php>; Второй пузырь доткомов или новая эра? URL : <http://betaserver.org/1342/vtoroj-puzyr-dotkomov-ili-novaya-e-ra.html>; Веб-парад погибших доткомов. URL : <http://your-hosting.ru/articles/other/dead-dotcoms/>; A Generation Lost in the Bazaar. Quality happens only when someone is responsible for it. URL : <http://queue.acm.org/detail.cfm?id=2349257>.

тем объединения большого количества модулей в единую сеть может быть поэлементно перемещен туда, куда необходимо, и сконцентрирован на месте в любых объемах.

Можно констатировать формирование новой парадигмы *data*-центра. Суть ее состоит в применении инноваций практически во всех аспектах деятельности центров обработки данных, которые оказывают непосредственное воздействие на формирование стратегического управления деятельностью ЦОД, а именно модульность, технология охлаждения, электропитание, управление инфраструктурой *data*-центра.

Обобщая сказанное выше, необходимо отметить, что в современных условиях начинает формироваться новая бизнес-модель функционирования *data*-центра, которой будет свойственно, как минимум, равное значение технических и экономических факторов, при этом вторые, скорее всего, со временем будут первенствовать. Таким образом, генеральной линией стратегии развития ЦОД в перспективе станет способность не только обеспечивать бесперебойное электропитание оборудования и эффективное охлаждение, но и удовлетворять все более изощренные потребности клиентов (пользователей) [7].

Руководству центров обработки данных в такой ситуации предстоит решать проблемы, обусловленные растущей сложностью взаимоотношений между всеми участниками этого рынка, и сформировать стратегию управления и развития информационного центра на основании адаптации моделей ИТ-развития к условиям и потребностям бизнеса в направлении их наиболее полного и эффективного удовлетворения как существующих, так и будущих [8]. *Data*-центр, таким образом, перестает быть предприятием чисто технологическим и становится постепенно обыкновенным деловым предприятием, занимающим на рынке и в бизнесе равную с другими позицию.

В этих условиях будет постепенно выстраиваться новая экономическая модель функционирования *data*-центра, которая будет состоять из целого ряда факторов, определяющих общую стоимость его материальных и нематериальных активов. В формировании и функционировании этой экономической модели будут равно участвовать как сами информационные центры, представленные своим руководством, так и потребители предоставляемых ими услуг. Поэтому данная модель будет состоять из следующих компонентов: эластичность, время простоя, укомплектованность персоналом, финансовые параметры (*выбор места, распределение налогового бремени, фактор восстановления капитала, внутренняя норма доходности, тайминг, вертикальная масштабируемость*).

Кроме того, необходимо также упомянуть об одном частном вопросе в формировании стратегии дальнейшего развития ЦОД – слияние технических и финансовых перспектив как бинарная модель стратегии. На практике же она выражается в сборке высокой плотности в стойках оборудования, посредством чего якобы достигается более высокая стоимость. Этот подход, как правило, не сходится с реалиями того, на что способна эффективная инфраструктура энергетического и охлаждающего оборудования центра. *Data*-центр, оборудованный в соответствии с новыми требованиями

обработки больших объемов информации, что, в свою очередь, связано с высокой плотностью серверов, в конечном счете получает возможность экономить средства за счет снижения мощности и охлаждения при сохранении его эффективности.

Таким образом, вышеизложенное требует подробного рассмотрения всех экономических аспектов операций ЦОД для того, чтобы понять последствия принятия рисков и истинность затрат.

Обобщая сказанное, необходимо отметить, что в новой формирующейся экономико-информационной парадигме непосредственное воздействие на создание модели стратегического управления *data*-центром оказывают два ключевых фактора, а именно масштабируемость и экономический комплекс-фактор.

*Масштабируемость* играет решающую роль в вопросе интенсивного развития любого бизнеса, и информационные центры не являются исключением. Сегодня, когда появились и широко применяются технологии виртуализации, изменилось само понятие масштабируемости, что привело к сокращению количества серверов и позволило увеличить плотность работы (загрузки) конкретного сервера. Увеличение ИТ-потребностей, реализуемое сегодня через интернет-фирмы, служащие провайдерами для миллионов конечных пользователей или предприятий с увеличивающимися запросами услуг, покрывается более интенсивным использованием оборудования, но, вместе с тем, предъявляет особые требования к его энергообеспечению и охлаждению.

Рост энергетических потребностей оборудования вынуждает в процессе реализации модели стратегического управления *data*-центром обращать пристальное внимание на эффективность использования энергии, альтернативные энергетические ресурсы и финансовую ответственность за время простоя информационного центра. Вертикальная масштабируемость подразумевает, что оценка необходимого энергообеспечения, требующегося для информационного центра сегодня, дает возможность спрогнозировать потребность в электроэнергии при увеличении как объемной, так и линейной загрузки оборудования центра. Это, в свою очередь, и определяет стратегический предел возможностей центра в его нынешнем состоянии и выявляет направления необходимой модернизации, что позволяет удвоить срок жизни информационного центра.

Таким образом, экономический комплекс-фактор включает в себя два элемента – экономику эффективного энергопользования и финансовое моделирование.

Преобладающим сегодня средством измерения эффективности использования энергии является *Power Usage Effectiveness (PUE)*, представляющий собой соотношение общего количества потребляемой ЦОД энергии и потребляемой ИТ-оборудованием энергией (затрачиваемой, в том чис-

ле, на охлаждение оборудования)<sup>2</sup>. Автоматизация инфраструктуры информационного центра позволяет в этих условиях оперативно выявлять потери энергии аппаратными средствами и оптимизировать их.

Финансовое моделирование в стратегическом управлении *data*-центром состоит из двух частей – капиталовложения и эксплуатационные расходы. Новая парадигма, предусматривающая удлинение срока жизни *data*-центра, отвергает традиционную модель, когда капиталовложения осуществляются на этапе постройки центра, а далее реализуются только эксплуатационные расходы. Сегодня капиталовложения – не столько здания и сооружения, сколько эффективно и интенсивно работающее оборудование, которое надо периодически обновлять. Это приводит к периодичности повторения капиталовложений в *data*-центр, что обеспечивает ему более долгий жизненный цикл.

Подводя итог, необходимо отметить, что эффективная модель стратегического управления *data*-центром – это та модель, которая сможет полностью учесть вопросы бизнеса и технологические аспекты в процессе планирования и формирования доступных вариантов. Тем не менее противоборство между технологическим составом и менеджментом *data*-центров все еще имеет место. Выходом из сложившейся ситуации является четкое осознание всеми сотрудниками центра, что это предприятие, которое предоставляет услуги для бизнеса. Поэтому потребуется успешная реализация стратегии центра, определенная деловая гибкость сотрудников, эффективное энергопользование, интенсификация работы оборудования. Все это обеспечит прочное положение *data*-центра в выбранном сегменте рынка.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агафонов А. Н., Зильберштейн О. Б. Стратегическое управление испытательными полигонами промышленности : тенденции, проблемы и пути их решения. М. : Изд-во «Перо», 2013. 168 с.
2. Rath J. Data Center Strategies. Simplifying high-stakes, mission critical decisions in a complex industry. URL : [http://vantagedatacenters.com/earthday/Pdf/DCK-datacenter\\_strategies.pdf](http://vantagedatacenters.com/earthday/Pdf/DCK-datacenter_strategies.pdf) (дата обращения : 08.04.2015).
3. Ершова Н. А. Концепция устойчивого развития – обеспечение экономической и социальной безопасности России // Вестн. Академии права и управления. 2013. № 30. С. 87–90.
4. Похвощев В. А. Стратегия социально-экономического развития Московской области до 2025 года : угрозы и возможности // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2012. № 10. С. 88–93.
5. Barroso L. A., Clidaras J., Hölzle U. The Datacenter as a Computer : An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines. 2013. 154 p. URL : <http://www.amazon.com/The-Datacenter-Computer-Introduction-Warehouse-Scale/dp/1627050094> (дата обращения : 08.04.2015).

---

<sup>2</sup> Подробнее о проблеме эффективности использования энергии ЦОД см. : Power usage effectiveness (PUE). URL : <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/power-usage-effectiveness-PUE>; Коварный PUE. URL : <http://habrahabr.ru/company/ua-hosting/blog/244603/>; Не PUE единым. URL : <http://www.osp.ru/lan/2014/05/13041191/>; Best Practices for Increasing Data Center Energy Efficiency. URL : <http://www.dell.com/downloads/global/power/ps1q08-20080185-Rad.pdf>.

6. Liu J., Goraczko M., James S., Belady C., Lu J., Whitehouse K. The Data Furnace : Heating Up with Cloud Computing. URL : <http://research.microsoft.com/pubs/150265/heating.pdf> (дата обращения : 08.04.2015).

7. Шкляр Т.Л., Скоморохова И. О. Разработка маркетинговой стратегии // Молодой ученый. 2014. № 15-1. С. 172–174.

8. Осипов В. С. Теория и методология конкурентного взаимодействия хозяйствующих субъектов : дис. ... д-ра экон. наук. М. : Ин-т экономики РАН, 2013. 243 с.

УДК 338.245

## **ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ**

**О. А. Папшева, Л. О. Сердюкова**

Саратовский государственный технический университет  
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77  
E-mail: komserd@mail.ru

В статье изучены потенциальные возможности и практический опыт предприятий оборонно-промышленного комплекса в области коммерциализации и передачи результатов инновационной деятельности в другие отрасли национальной экономики. Определены ключевые проблемы и особенности коммерциализации результатов инновационной деятельности оборонно-промышленного комплекса и выделены целевые задачи для эффективной организации и перспективного развития данного процесса в современных российских условиях.

*Ключевые слова:* результаты инновационной деятельности, коммерциализация, защита прав интеллектуальной собственности, государственная политика.

### **Features and Prospects of Commercialization and Utilization of the Results of Innovative Activity of the Russian Military Industry Complex**

**O. A. Papsheva, L. O. Serdukova**

The article explored the potential and practical experience for the defence industry in the commercialization and transfer of results of innovative activity in other sectors of the national economy. Identified key issues and features commercialization the results of innovative activity of the military-industrial complex and selected targets for effective organization and development of this process in modern Russian conditions.

*Key words:* results of innovation, commercialization, intellectual property, public policy.

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) России исторически является передовым центром научно-технологического развития всех отраслей экономики и, несмотря на глубокий кризис 1990-х гг., обладает значительным инновационным потенциалом. Результаты научно-технической деятельности ОПК используются при создании инноваций, обеспечивающих конкурентоспособность товаров на рынке.

По итогам обязательного государственного учета результатов инновационной деятельности, установленного постановлением Правительства Российской Федерации от 26.02.2002г. № 131[1], в Едином реестре результатов инновационной деятельности (РИД) зарегистрированы более 11 тыс. объектов учета, принадлежащих Министерству обороны страны (рис. 1). Их коммерциализация и передача в гражданский сектор экономики, как показывает опыт зарубежных стран, может значительно повысить эффективность затраченных средств федерального и регионального бюджетов за счет поступления дополнительных налогов от реализации гражданской продукции и повышения рентабельности оборонного производства при ее выпуске.

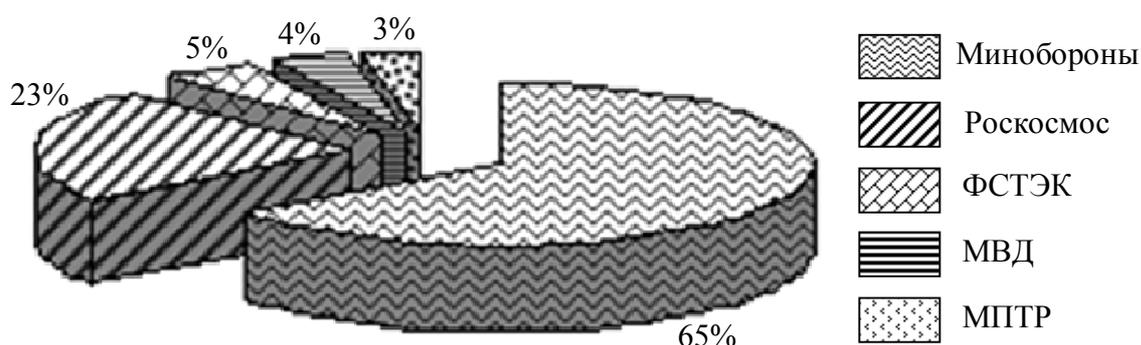


Рис. 1 Распределение РИД военного специального и двойного назначения в соответствии с Единым реестром

В рамках Федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008–2015 гг.» [2] разработаны более ста технологий, коммерчески пригодных в области сверхвысокочастотной электроники, радиационно-стойкой электронной компонентной базы, микросистемной техники, микроэлектроники.

В авиационной промышленности широко применяются разработки ОАО «НПО «Сатурн», производящего энергетическую газовую турбину большой мощности ГТД-110. Данная турбина используется также для реконструкции и нового строительства электростанций высокоэффективного парогазового цикла (на Рязанской и Ивановской ГРЭС) [3].

В сфере диагностирования населения применяются высокоразрешающие системы диагностики, томографы, аппараты искусственной вентиляции легких, материалы для офтальмологии, разработанные в рамках реализации программы по медицинскому приборостроению ОАО «НПК "Оптические системы и технологии"», специализирующемуся на производстве лазерных приборов [4].

В нефтегазодобывающей промышленности успешно используется аппаратура автоматического измерения параметров, дозирования и регистрации для систем управления процессами добычи, транспортировки и распределения, выпускаемая на оборонном предприятии ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики» [3].

Таким образом, в практическом опыте ряда предприятий ОПК существуют примеры успешной реализации результатов научно-технической деятельности в гражданском секторе экономики.

В то же время в России отсутствует системность и повсеместность коммерциализации результатов инновационной деятельности ОПК в экономике как на федеральном и региональном, так и на отраслевом уровнях. В области реализации коммерческого потенциала РИД ОПК можно выделить следующие основные проблемы:

- процедура регулярной передачи РИД, имеющих коммерческий потенциал, из фундаментальной науки в прикладную сферу нормативно не установлена;

- работы подготовительной стадии коммерциализации (экспертиза возможных последствий свободного распространения РИД для обороны страны, рассекречивание и «легендирование» сведений о специальном назначении РИД) не организованы;

- возможность коммерческого использования РИД ОПК в интересах развития экономики страны в настоящее время не регламентирована на государственном уровне.

Процесс коммерциализации РИД в ОПК тормозят также следующие отраслевые особенности, выявленные авторами на основе изучения научных публикаций [3–5]:

- отсутствие конкуренции как фактора стимулирования коммерциализации инновационной деятельности из-за формирования государственного оборонного заказа с расчетом на конкретных исполнителей;

- ограничение выбора партнеров и технологической базы, закрепление кооперативных связей предприятий на основе корпоративных интересов из-за создания вертикально интегрированных структур и государственных корпораций;

- невозможность долгосрочного планирования инновационного развития оборонных предприятий из-за отсутствия стабильности их финансового положения;

- ограничение работы со средствами частных инвесторов для коммерческого освоения результатов инновационной деятельности военного, специального и двойного назначения из-за отсутствия условий и правил распределения прибыли между участниками инновационного проекта;

- несоблюдение баланса интересов: автор – соисполнитель – заказчик из-за того, что имущественное право собственности на все результаты инновационной деятельности оборонных предприятий, созданных за счет бюджетных средств, принадлежит государству.

С учетом изложенного авторами выделены общие целевые задачи, способствующие развитию инновационного процесса и коммерциализации РИД предприятий ОПК:

- организация грамотного государственного и нормативно-правового регулирования инновационной деятельности;

–использование в коммерческих интересах двойных технологий ОПК на основе унификации технологической базы оборонной и гражданской продукции;

–привлечение дополнительных средств сторонних инвесторов, направленных на технологическое развитие ОПК по наиболее важным направлениям создания новейшего вооружения и гражданской продукции, конкурентоспособной на внешнем рынке.

Государственное и нормативно-правовое регулирование инновационной деятельности должно осуществляться на основе сохранения рационального баланса между ответственностью государственных заказчиков за обеспечение ВС РФ новым вооружением и интересами предпринимателей, главная цель которых – получение прибыли за счет коммерциализации оборонных результатов научно-технической деятельности.

Основной формой, позволяющей учесть в равной мере государственные (оборонные) и частные (коммерческие) интересы при организации инновационной деятельности в ОПК, может стать государственно-частное партнерство, а способом соблюдения партнерских интересов – разработанная программа создания и трансферта двойных технологий [3].

Исключительные права на РИД, созданные на бюджетные средства, можно закрепить за государством только в том случае, если они затрагивают интересы обороны и национальной безопасности. Во всех остальных случаях права следует закреплять за разработчиками результатов интеллектуальной деятельности, способными более оперативно взаимодействовать с инвесторами, чем это делает любое из государственных ведомств.

В целях организации контроля за осуществлением инновационного процесса в ОПК необходимо создать систему с единым центром управления, позволяющую отслеживать возникающие проблемы в области коммерциализации РИД, своевременно их прорабатывать, нормативно регулировать и стимулировать удачные решения, механизмы и типовые процедуры коммерциализации: от отбора интересующих РИД до реализации их в нововведениях, способных к повышению конкурентоспособности товара на рынке без ущерба для безопасности страны (рис. 2).

Производители, разработчики и связанные с процессом создания РИД инфраструктурные организации субъектов РФ контролируются региональными инновационными центрами. Данные центры регистрируют полученные результаты по региону, сортируют их по отраслевому признаку и направляют в соответствующие межрегиональные отраслевые инновационные центры. Здесь проводится отбор РИД, имеющих коммерческий потенциал, в контексте их применения в определенных отраслях промышленности. Единое управление и контроль над всеми отраслевыми инновационными центрами осуществляет межотраслевой инновационный центр.

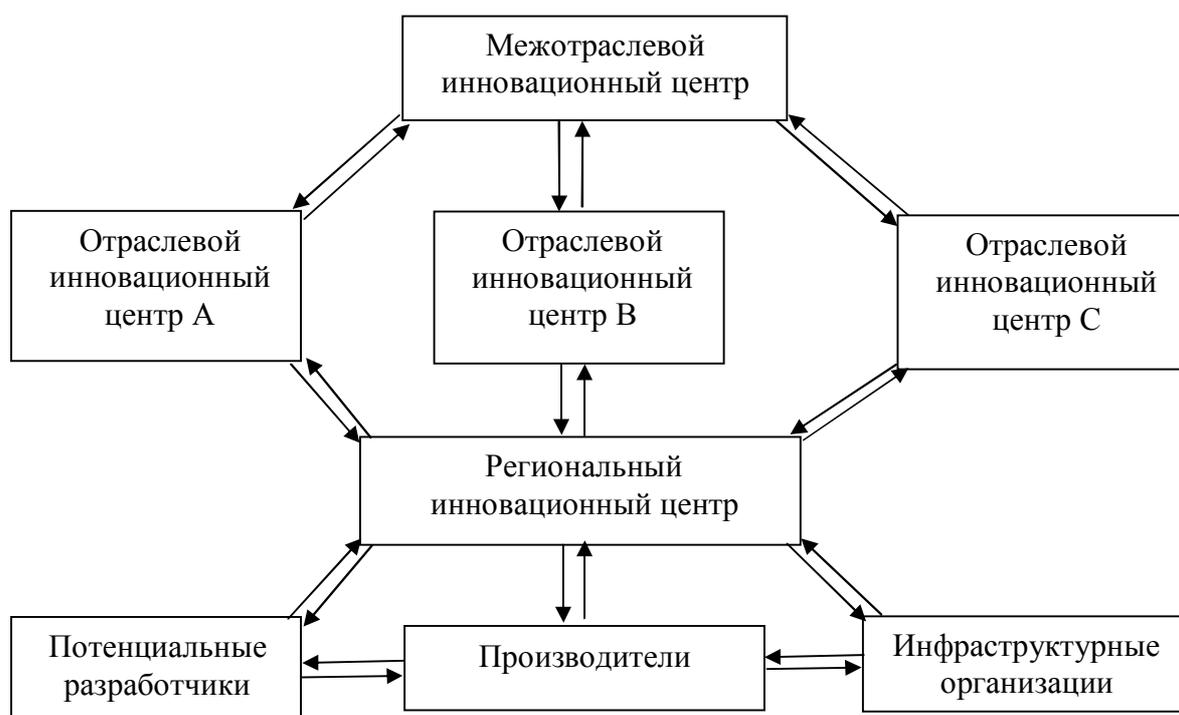


Рис. 2. Единый центр управления инновационной системой в ОПК

Опережающее создание единого центра с функциями аккредитации организаций инновационной инфраструктуры ОПК и полномочиями посредника государственных органов управления позволит обеспечить:

- проведение грамотной государственной политики в области инновационного развития ОПК на основе коммерческого использования РИД для привлечения дополнительных инвестиций;

- осуществление государственного контроля над соблюдением баланса государственных и частных интересов основных участников инновационного процесса;

- организацию государственного управления инновационной системой, дающую возможность использовать программное планирование, создание и трансферт двойных технологий, экспертный отбор РИД ОПК без ущерба для безопасности страны.

Основными принципами формирования инновационной системы и коммерциализации РИД предприятий ОПК должны стать доступность информации и услуг, а также экономическая привлекательность для всех участников инновационного процесса, выражающаяся в получении ряда ощутимых преимуществ [4]:

- доступная информация о РИД, имеющих коммерческий потенциал;
- возможность приобретения прав на интересующие РИД;
- доступное оформление договорных отношений между субъектами инновационной деятельности (заказчиками, разработчиками, инвесторами);
- налоговые льготы участникам инновационного процесса;
- возможная частичная компенсация рисков, связанных с адаптацией оборонной продукции к рыночным условиям;

–доступное кредитование на льготных условиях, в том числе под будущую продукцию;

–доступные консалтинговые, маркетинговые услуги.

Важным принципом также станет сочетание ответственности за обеспечение оборонных приоритетов и свободы выбора путей коммерциализации в рамках действующего законодательства, нуждающегося в дальнейшем совершенствовании.

Признавая актуальность международной таможенной защиты российской интеллектуальной собственности в рамках экспорта продукции военного, специального и двойного назначения, необходимо активнее использовать способы правовой охраны РИД военного, специального и двойного назначения, включенных в перечень Роспатента как объекты авторского права и смежных прав для последующей передачи Федеральной таможенной службе и включения в Единый таможенный реестр объектов интеллектуальной собственности.

Таким образом, в результате исследования процессов коммерциализации и использования РИД ОПК можно сделать следующие выводы.

В настоящее время коммерческий потенциал РИД ОПК не используется из-за ряда существующих проблем, связанных с государственным регулированием и особенностями оборонной отрасли.

Эффективное использование РИД ОПК в коммерческих интересах возможно при реализации ряда задач, прежде всего, при создании единого центра управления инновационной системой Российской Федерации и системы информационного обеспечения, развитии малого инновационного бизнеса, определении прав на объекты интеллектуальной собственности и обеспечении их надежной защитой от несанкционированного использования.

Среди исследователей распространена теория, согласно которой успех коммерциализации РИД зависит от разнообразия продукции, гибкости производства и способности к определению и удовлетворению потребительского спроса [3]. По нашему мнению, успех коммерциализации РИД обеспечивается, прежде всего, грамотной государственной политикой в области подготовки и осуществления коммерциализации РИД ОПК.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О государственном учете результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ военного, специального и двойного назначения : постановление Правительства Российской Федерации от 26.02.2002 г. № 131. URL : <http://base.garant.ru/184207/> (дата обращения : 18.03.2015).

2. Распоряжение Правительства РФ от 23 июля 2007 г. № 972-р. URL : <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/91576/> (дата обращения : 18.03.2015).

3. *Караваев И. Е.* Некоторые аспекты организации инновационной деятельности в оборонно-промышленном комплексе Российской Федерации // Оборонно-промышленный комплекс России : федеральный справочник. URL : <http://federalbook.ru/projects/projects/arhiv.html> (дата обращения : 15.02.2015).

4. *Петров Д. М.* Инновационная деятельность предприятий и организаций оборонно-промышленного комплекса России в условиях модернизации экономики : автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2013. 21 с.

5. Клочкова А. А. Повышение конкурентоспособности предприятий военно-промышленного комплекса на основе диверсификации их производственной деятельности : автореф. дис. ... канд. экон. наук. Тула, 2013. 20 с.

УДК 336

## **ФИНАНСОВЫЕ РИСКИ В УСЛОВИЯХ САНКЦИЙ: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ**

**Л. В. Славнецкова, М. Д. Слугина**

Саратовский государственный технический университет  
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77  
E-mail: lvsla@mail.ru

В статье рассматриваются некоторые из проблем, с которыми столкнулась Россия на современном этапе, финансовые риски, возникшие в связи с введением санкций, кризисная ситуация в экономике, а также возможные направления снижения последствий от сложившейся экономической и политической ситуации и минимизации финансовых рисков.

*Ключевые слова:* финансовый риск, санкция, нестабильность, кредитная политика, инфляция.

### **Financial Risks in the Sanctions: New Challenges and New Opportunities**

**L. V. Slavnechkova, M. D. Slugina**

The article discusses various problems faced by Russia at the present stage, what financial risks have arisen in connection with the imposition of sanctions and the crisis in the economy. As well as possible areas to minimize the financial risks

*Key words:* financial risk, sanction, instability, credit policy, inflation.

Процесс глобализации можно считать принципиально новым этапом развития мировой экономики. Расширение экономических связей в мире привело к невозможности существования отдельной страны изолированно. Политическая и экономическая конъюнктура рынка постоянно меняется. Спрогнозировать, какие произойдут изменения, не всегда представляется возможным. Поэтому любые изменения в мировой экономике напрямую связаны с неопределенностью и риском.

Российская экономика в настоящий момент не является совершенной, как и любая другая экономика развивающихся стран. Существует очень много проблем, которые необходимо решать, и главной является экспортно-сырьевая направленность экономики России. В контексте событий, произошедших на мировой арене (введение экономических санкций против России, присоединение Крыма, действия на Украине), наша страна столкнулась с новыми вызовами, ограничениями, которые негативно отражаются на ее экономике. Хотя в данной ситуации мнения отдельных экономистов, политиков и ученых разделились. Одни считают, что экономические санк-

ции, снижение цен на нефть – это единственный путь для российских предприятий стать конкурентоспособными, а для России – возможность стать не только основным поставщиком сырья, но и мощной производственной державой, т. е. сложившееся экономическое противостояние может дать импульс к развитию отечественного производства. Другие считают, что в данных условиях российская экономика не сможет получать новых технологий и выдержать давления со стороны Запада. Наступит кризис и многие предприятия попадут под удар и уйдут с рынка.

Для того чтобы решить данную проблему, необходимо уделить особое внимание не только развитию отечественных предприятий и организаций, но и величине рисков, которым они подвергаются. В рыночной экономике риски присутствуют в деятельности любого предприятия. Но объективные условия, политические и экономические события приводят к тому, что риски растут. В кратко- и среднесрочной перспективе серьезными представляются финансовые риски, под которыми нами понимаются возможности возникновения неблагоприятных последствий, которые выражаются в форме потери капитала и дохода, снижения прибыльности при ведении хозяйственной деятельности. Наиболее распространенными видами финансовых рисков, которым подвергаются отечественные предприятия, являются:

- снижение финансовой устойчивости;
- инвестиционный;
- инфляционный;
- процентный;
- валютный;
- кредитный.

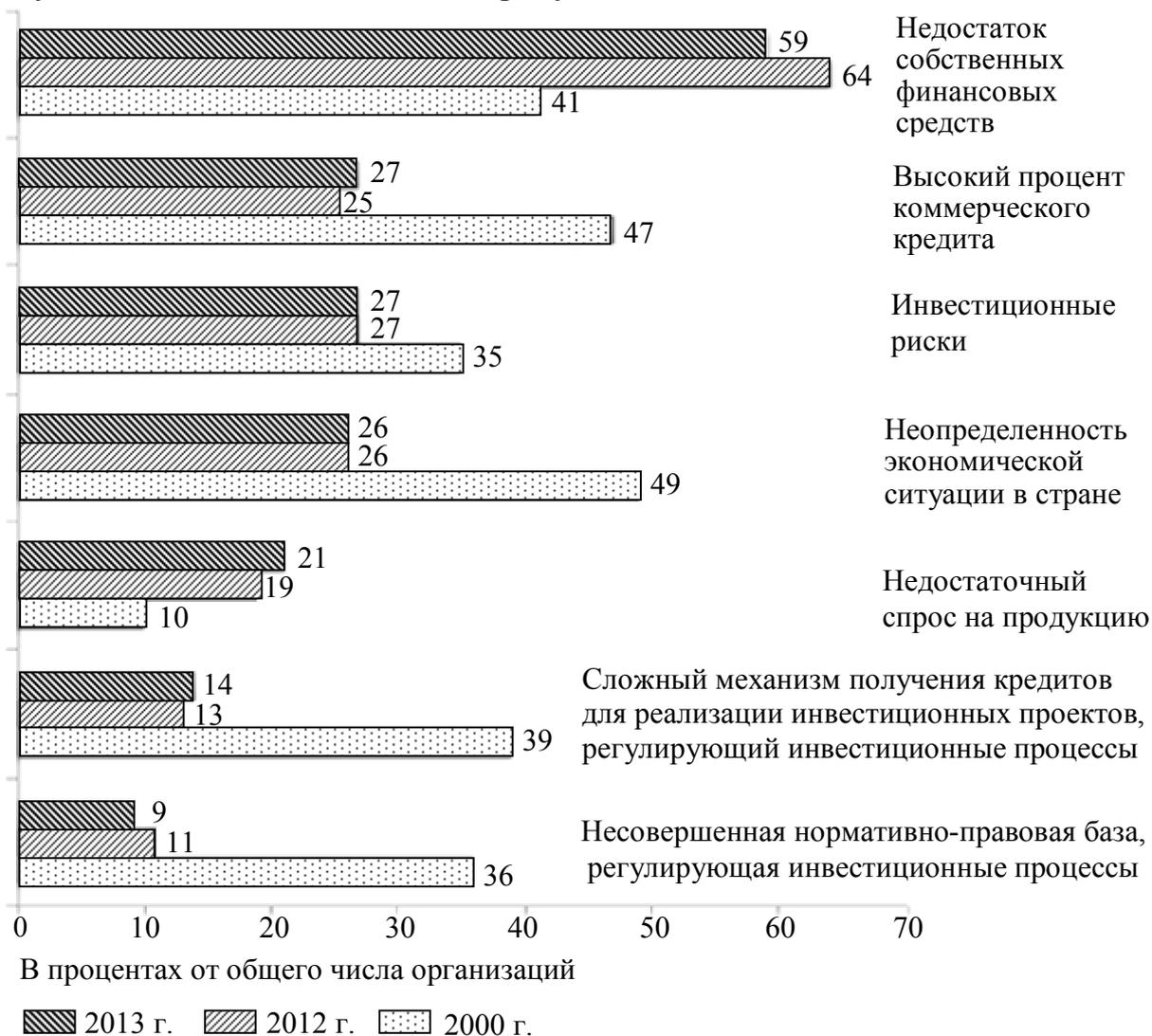
В условиях санкций повышается как вероятность появления данных рисков, так и их последствий. В данном случае поддержка государства просто необходима.

Правительством РФ предпринимаются определенные шаги в этом направлении. Необходимо отметить, что в январе 2015 г. разработан антикризисный план первоочередных мероприятий по обеспечению устойчивого развития экономики и социальной стабильности. Согласно утвержденному плану достаточно большой объем денежных средств будет выделяться на поддержание нормального функционирования банковской сферы (до 1550 млрд руб.), сельского хозяйства (до 54 млрд руб.), социальной политики (до 296,2 млрд руб.), а также на развитие малого и среднего предпринимательства [1]. В производственном секторе экономики основное внимание уделяется, в первую очередь, предприятиям оборонно-промышленного комплекса, а также предприятиям, экспортирующим производимые товары. Безусловно, стимулирование экспорта должно благотворно влиять на производственный сектор, однако встает вопрос, что Россия собирается экспортировать, если большинство ее продукции просто не сможет конкурировать с зарубежными товарами (за исключением топливно-энергетической продукции)?

Остановимся более подробно на основных из вышеперечисленных финансовых рисках, с которыми уже столкнулись российские предприятия и организации.

В период экономических ограничений со стороны Запада крупнейшие организации, такие как «Газпром Нефть», «Роснефть», ОАО «Сбербанк России», ВТБ и другие, подвергаются **инвестиционному** риску. Инвестиционный риск заключается в вероятности потери или неполучении прибыли инвестором (например, риск неполучения прибыли долгосрочных финансовых вложений). Перечисленные российские компании имеют портфельные инвестиции за рубежом. В результате введения пакета санкций со стороны стран ЕС, США, Австралии, Канады и Норвегии возможность совершения операций с портфельными инвестициями и организацией их управления в настоящий момент исключена.

В результате политической нестабильности происходит отток иностранных инвесторов, что, в свою очередь, приводит к тому, что предприниматели лишаются возможности получить дополнительный капитал, которого и так не хватает в стране. Факторы, ограничивающие инвестиционную деятельность, показаны на рисунке.



Распределение организаций по оценке факторов, ограничивающих инвестиционную деятельность [2]

Статистика такова, что основными ограничениями инвестиций являются недостаток собственных финансовых средств, высокий процент коммерческого кредита, инвестиционные риски, а также неопределенность экономической ситуации в стране.

Кроме того, велика вероятность **валютного** риска. Практически с начала 2014 г. мы наблюдаем значительные колебания валютных курсов. Стоит отметить, что за 2014 г. национальная валюта подешевела по отношению к доллару примерно на 60%. Это означает, что на 60% сократились собственные средства и финансовый результат деятельности организаций. Хотя к концу первого квартала 2015 г. национальная валюта стала укрепляться. Более того, вследствие колебаний курса национальной валюты большинство юридических и физических лиц «играют» на валютном рынке, а это очередной отток капитала из страны.

Валютные колебания привели к повышению цен. Вследствие этого предприятия и организации столкнулись с еще одной разновидностью финансового риска – **риск инфляционный**. Этот вид риска характеризуется возможностью обесценения реальной стоимости капитала (в форме финансовых активов предприятия), а также ожидаемых доходов от осуществления финансовых операций в условиях инфляции. Данный вид риска в современных условиях носит постоянный характер и сопровождает практически все финансовые операции [3]. Инфляция приводит к дополнительным издержкам, так как вследствие нее дорожает все: сырье, материалы, различные работы и услуги. Так, в декабре 2014 г. уровень инфляции составил 1,7%, а за весь 2014 г., по официальным данным, – 10,4% [4]. Реально данная цифра значительно выше. Соответственно на этот уровень инфляции выросли издержки предприятий и организаций.

Касательно процентного риска можно отметить, что это риск для прибыли, возникающий из-за неблагоприятных колебаний процентной ставки, которые приводят к повышению затрат на выплату процентов или снижению доходов от вложений и поступлений от предоставленных кредитов. Процентный риск возникает при различных изменениях государственного регулирования финансового рынка страны, при росте или снижении предложения свободных денежных ресурсов [3].

Известно, что многие крупнейшие российские компании до введения санкций предпочитали кредитование за рубежом в связи с тем, что это более приемлемо. Процентные ставки по кредитам в иностранных банках составляют менее 10% годовых, в то время как в отечественных – около 15–30% в год. В настоящий момент финансирование на Западе для российских организаций представляется невозможным, это приведет к дополнительным издержкам на услуги кредитования в России.

Если в краткосрочной перспективе последствия санкций небольшие, то в долгосрочной санкции способны оказать наибольшее негативное влияние и привести к достаточно тяжелым последствиям. Политика санкций направлена на вытеснение России с топливного рынка Европы, закрытие каналов внешнего финансирования. Внешние долги дают около 40% всего

объема заемных денег, привлекаемых экономикой, которые нужно будет чем-то замещать, и это уже те вызовы, с которыми достаточно сложно справляться.

Как Россия будет преодолевать сделанные ей вызовы, во многом будет зависеть от кредитно-денежной политики нашего государства. В кредитно-денежной политике, на наш взгляд, можно выделить следующие недостатки:

- инфляционное таргетирование;
- привязку рубля к ценам на нефть;
- тенденцию профицита бюджета.

В настоящее время для уменьшения последствий от сложившейся ситуации должны предприниматься активные меры на государственном уровне. По нашему мнению, особое внимание необходимо уделить кредитно-денежной политике, которая должна быть направлена на поддержку малого и среднего бизнеса, в том числе предоставление грантов малым инновационным предприятиям на финансовое обеспечение инновационных проектов, имеющих перспективу коммерциализации, а также на проведение оценки и мониторинга технологического уровня проектов, реализуемых в рамках программ импортозамещения.

Для последующего повышения показателя деловой активности в стране необходимо под приемлемый процент профинансировать промышленный сектор, главным образом в целях модернизации основных фондов предприятий и усиления контроля качества продукции, а уже в среднесрочной перспективе – рассматривать стимулирование экспорта.

Основной акцент надо сделать на внутренних источниках кредитования и определить инструменты ЦБ в сложившейся ситуации.

На наш взгляд, следующие направления будут способствовать минимизации финансовых рисков:

- переход от внешних источников кредитования к внутренним, что позволит избежать конвертации рубля в валюту для последующего вывоза за рубеж;
- создание в стране условий для расширения предпринимательских свобод и снижения внутри страны рисков;
- поиск инвесторов из блока развивающихся стран АТЭС или БРИКС. Необходимо наличие прямых иностранных инвестиций, несущих новые технологии;
- снижение процентной ставки;
- разработка и применение пакета налоговых льгот для тех предприятий, которые готовы наращивать производство;
- определение официального курса рубля на основе ресурсов, обращающихся и используемых внутри страны (сейчас на основе соотношения экспортных и импортных потоков).

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящий момент российской экономике предстоит пройти нелегкий путь. Возможно, именно

сейчас нашей стране представилась возможность вернуть производственный потенциал. Предприятиям необходима более гибкая и мягкая кредитная политика банков, более крепкая национальная валюта, а также увеличение притока инвестиций. В связи с этим следует иметь более диверсифицированную экономику, в полной мере на практике реализовывать программу импортозамещения, а также иметь свою развитую финансовую систему, чтобы предприятия имели возможность финансировать новые проекты за счет внутреннего финансирования и не полагаться на внешние заимствования. Рассмотренные направления будут способствовать минимизации финансовых рисков.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении плана первоочередных мероприятий по обеспечению устойчивого развития экономики и социальной стабильности в 2015 году : Распоряжение Правительства РФ от 27.01.2015 № 98-П. URL : <http://www.garant.ru/hotlaw/federal/603861/> (дата обращения : 14.04.2015).
2. Распределение организаций по оценке факторов, ограничивающих инвестиционную деятельность. URL : <http://www.gks.ru/dbscripts/cbsd/DBInet.cgi?pl=9000260> (дата обращения : 14.04.2015).
3. Системы управления бизнес-процессами. URL : <http://www.journal.itmane.ru> (дата обращения : 15.04.2015).
4. Инфляция в России в 2014. URL : <http://www.newsru.com> (дата обращения : 12.03.2015).

# ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

## 1. Общие положения

1.1. Сборник «Гетеромагнитная микроэлектроника» выходит 4 раза в год – 2 раза в год в открытом и 2 раза в год в ограниченном доступе (спецвыпуски) и публикует материалы 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 самодостаточной без апелляции к тексту (например, Рис. 1. Зависимость ...). Подписи к рисункам не должны выходить за его границы. Точка в конце подрисуночной подписи не ставится. Ссылка на рисунок должна предшествовать ему.

3.6. Нумеровать следует наиболее важные формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте. Номер располагают по правому краю полосы по центру формулы.

3.7. Библиографический список оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 и открывается размещенным по центру заголовком. Все ссылки даются в квадратных скобках (например, [4]). Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Библиографическое описание оформляется следующим образом:

Образец описания книги:

1. *Игнатъев А. В., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 380 с.

Образец описания статьи в журнале:

2. *Игнатъев А. А., Страхова Л. Л., Овчинников С. В.* Профессиональная направленность современного курса физики для студентов-геофизиков классического университета // Физическое образование в вузах. 2002. № 2. С. 14–18.

3. *Poon H. C.* Modeling of bipolar transistor using integral charge control model with application to third-order distortion studies // IEEE Trans. 1972. Vol. ED-12, № 6. P. 719–731.

Образец описания статьи в сборнике:

4. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. В.* О времени тепловой готовности феррит-транзисторного СВЧ-генератора на высоких уровнях мощности // 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, МПК<sup>7</sup> Н 01 L 43/08, Н 01 L 27/14, G 01 R 33/05, G 01 R 33/04. Устройство для измерения магнитного поля / заявители Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Ляшенко А. В., Романченко Л. А., Солопов А. А. ; патентообладатель ОАО «НИИ-Тантал». – № 20700125198U ; заявл. 03.07.2007 ; опубл. 27.04.2008.

#### **4. Требования к оформлению электронной версии**

4.1. Текст рукописи должен быть представлен в виде одного файла на 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 «Институт критических технологий»  
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 (2 спецвыпуска в год) 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. Рассылка осуществляется по адресам, указанным авторами.

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
<b>Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии</b>	
<i>Овчинников С. В., Ретунский А. С.</i> Возможность использования термоэлектрических модулей для термостабилизации гетеромагнитного датчика магнитного поля в условиях повышенной температуры среды.....	4
<i>Ляшенко А. В., Хвалин А. Л., Сотов Л. С.</i> Магнитные свойства пленок железо-иттриевого граната в ненасыщенных состояниях.....	11
<i>Морозова М. А., Шараевская А. Ю.</i> Особенности формирования запрещенных зон в структуре двух магнитных кристаллов с фазовым сдвигом относительно друг друга.....	22
<i>Садовников А. В., Бубликов К. В., Константинова М. А., Бегинин Е. Н., Шешукова С. Е.</i> Эффекты невзаимности при распространении гибридных волн в поперечно ограниченной слоистой мультиферроидной структуре.....	29
<i>Аникин В. М.</i> О конструктивном определении случайных величин и моделировании диффузионных процессов в автоэмиссионной электронике.....	35
<i>Ляшенко А. В., Малярчук В. А.</i> Способы построения модулей преобразования форматов данных в вычислительной технике.....	42
<i>Игнатьев А. А., Проскуряков Г. М., Васильев А. В., Маслов А. А.</i> Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (хронометрический способ автономной ориентации).....	53
<i>Малярчук В. А., Солопов А. А.</i> Устройство для реализации высокоскоростных криптографических шифров.....	62
<i>Ляшенко А. В., Сотов Л. С., Хвалин А. Л., Чесаков В. С.</i> Микропроцессор с ускоренной манипуляцией битами данных для обработки сигналов в системах связи.....	72
<i>Проскуряков Г. М., Игнатьев А. А., Маслов А. А.</i> Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (гармонический способ автономной ориентации).....	81
<i>Кудрявцева С. П., Петров А. Н.</i> Теоретическое исследование зависимости баллистического коэффициента размагничивания от геометрических размеров аксиально-намагниченных кольцевых магнитов.....	89
<b>Методические аспекты физического образования</b>	
<i>Игнатьев А. А., Кудрявцева С. П., Романченко Л. А.</i> Магистерская программа «Магнитоэлектроника в системах защиты информации и безопасности»....	92
<i>Романченко Л. А.</i> Современные образовательные технологии при преподавании специальных дисциплин.....	98
<b>Экономика в промышленности</b>	
<i>Плотников Д. А., Плотников А. Н.</i> Инвестирование наукоемких высокотехнологичных инновационных предприятий.....	102
<i>Вьюнова Р. Р.</i> Применение концепции проектного управления в инновационной деятельности.....	118
<i>Ляшенко М. А.</i> Модели стратегического управления деятельностью центров обработки данных.....	124
<i>Папшева О. А., Сердюкова Л. О.</i> Особенности и перспективы коммерциализации и использования результатов инновационной деятельности оборонно-промышленного комплекса России.....	132
<i>Славнецкова Л. В., Слугина М. Д.</i> Финансовые риски в условиях санкций: новые вызовы и новые возможности.....	138
Правила для авторов.....	144
Правила депонирования.....	146

**Подписка на 2016 г.**

Индекс издания по объединенному каталогу «Пресса России» 29005,  
Интернет-каталог Агентства «Книга-Сервис»,  
раздел 24 «Компьютеры. Информатика. Программные продукты»,  
раздел 30 «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов».  
Сборник выходит 4 раза в год – 2 раза в год в открытом и 2 раза в год в ограниченном  
доступе (спецвыпуски).

Научное издание

## **ГЕТЕРОМАГНИТНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

*Сборник научных трудов*

Выпуск 18

**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 19.06.2015. Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. 8,60 (9,25). Тираж 100. Заказ .

---

Издательство Саратовского университета. 410012, Саратов, Астраханская, 83.  
Типография ИП Волков В.В. 410056, Саратов, Рабочая, 105