# Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

1

2015

**Главный редактор**

**В.Л. Белоусов** — д.э.н., проф., МГУПИ

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Бучаченко А.Л.** — д.х.н., проф., ИПХФ РАН
**Гусев А.А.** — д.т.н., проф., МГТУ "СТАНКИН"
**Дегтярёв Ю.И.** — д.т.н., проф., МАИ
**Елисеев В.А.** — д.т.н., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
**Иванов А.П.** — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
**Мальцева С.В.** — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
**Нефёдов Е.И.** — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
**Шебалин И.Ю.** — к.ф.-м.н., ООО "Изд-во Инновационное машиностроение" (заместитель главного редактора)
**Янович Е.Л.** — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор-организатор — **Осипова В.Г.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

**УЧРЕДИТЕЛИ:**
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г. за № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"

***Адрес редакции:***
***107076, Москва,***
***Колодезный пер., 2А, стр. 2.***
***Тел.: (495) 661-38-80.***
***E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;***
***http://www.mashin.ru***

***Адрес издательства:***
***107076, Москва,***
***Стромынский пер., 4.***
***Тел.: (499) 268-38-58.***
***факс: (499) 269-48-97.***

**© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2015 г.**

# СОДЕРЖАНИЕ


## АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**Капранов В.В., Тугаенко В.Ю.** Маркерные системы в экспериментальных исследованиях дистанционной передачи энергии инфракрасным излучением через атмосферу . . 3

**Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С., Мироненко Я.В.** Аппаратный анализ и моделирование статистических характеристик частичных разрядов для интродиагностики высоковольтного оборудования . . . . . 10

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Васильев В.А., Хошев А.В.** Магнетронное распыление из двух источников в процессе образования гетерогенных структур нано- и микроэлектромеханических систем . . 17

**Кай Шень, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Исследование степени наблюдаемости погрешностей автономных инерциальных навигационных систем . . . . . 24

**Салеев Д.В.** Адаптивный алгоритм управления технологическим процессом производства интегральных схем с подстройкой параметров модели . . . . . 30

**Микаева С.А., Ашрятов А.А., Косицын А.А.** Метод прямого жидкостного охлаждения полупроводниковых источников света и систем освещения на их основе . . . . 34

**Бигалиева А.З., Коккоз М.М., Аймагамбетова Р.Ж., Сайлаукызы Ж.** Определение напряжённо-деформированного состояния массива горных пород . . . . . 36

## ЭКОНОМИКА

**Лавреш И.И., Ланских Ю.В.** Агентный подход к формированию технологической платформы информационно-аналитической системы . . . . . 39

## ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

**"Агропродмаш-2014":** у агропромышленного рынка России большой потенциал . . . . . 44

## ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

**По страницам** журналов . . . . . 46


# CONTENTS


## AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

**V.V. Kapranov, V.Yu. Tugaenko.** Marker systems at experimental research of the energy of distance transmission through the infrared radiation across atmosphere . 3

**V.A. Shakhnin, Yu.S. Chebryakova, Ya.V. Mironenko.** The hardware analysis and modeling of the partial categories statistical characteristics for the high-voltage equipment introdiagnostics . . . . . 10

## MODERN TECHNOLOGIES

**V.A. Vasilev, A.V. Khoshev.** Magnetron dispersion from two sources in the formation process of nano- and microelectromechanical systems heterogeneous structures . 17

**Kay Shen, A.V. Proletarskiy, K.A. Neusypin.** Research of errors observability degree for autonomous inertial navigation systems . . . . . 24

**D.V. Saleev.** Management adaptive algorithm of the production technological process of integrated schemes with model parameters fine tuning . . . . . 30

**S.A. Mikaeva, A.A. Ashryatov, A.A. Kositsin.** Direct liquid cooling method of semiconductor light sources and systems of lighting on their basis. . . . . 34

**A.Z. Bigalieva, M.M. Kokkoz, R.Zh. Aymagambetova, Zh. Saylaukyzy.** Definition of the stress — deformed condition of the mountain mass . . . . . 36

## ECONOMICS

**I.I. Lavresh, Yu.V. Lanskikh.** Agent approach to a technological platform formation of information and analytical system . . . . . 39

## EXIBITIONS AND PRESENTATIONS

**"Agropodmash-2014":** Russian agroindustrial market has great potential . . . . . 44

## SURVEY OF PERIODICALS

**Periodicals** review . . . . . 46



**Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России" — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499)269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 5298**

Сдано в набор 30.10.2014.
Подписано в печать 09.12.2014.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная

Отпечатано в ООО «Канцлер»,
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru



**Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация и современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация и современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель**

**© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2015 г.**

УДК 004.93'12:535.247.4

**В.В. Капранов, В.Ю. Тугаенко** (ОАО "РКК "Энергия", г. Королёв)
vitaliy.kapranov@yandex.ru

# МАРКЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ

*Проанализированы возможности использования в условиях нетурбулентной атмосферы различных маркерных схем, расположенных на приёмном фотоэлектрическом преобразователе. Показана принципиальная возможность построения автономной подсистемы обнаружения приёмника для дистанционной передачи энергии инфракрасным (ИК) излучением на основе распознавания маркеров. Определены границы использования конкретных типов схем. Проведены экспериментальные исследования в различных условиях видимости маркерных схем. Создан макет цельной системы дистанционной передачи энергии ИК-излучением с подсистемой наведения, основанной на распознавании маркеров. Приведены основные моменты работы используемого алгоритма системы распознавания.*

**Ключевые слова:** лазерная система передачи энергии, маркерная система, система распознавания образов.

*Utilization possibilities of various marker schemes at non-turbulent atmosphere condition located on the receiving photoelectric transformer are analysed. Construction principle possibility of the receiver revealing autonomous subsystem for detection based on computer vision markers for wireless energy transfer system for energy transmission by infrared radiation (IR) from markers recognition is presented. Utilization limitations of the specific scheme type are determined. Experimental researches in different visibility conditions of the marker schemes are carried out. Whole system model of the energy distance transmission by IR radiation with induction subsystem based on markers recognition is created. Main work moments of the markers recognition utilized algorithm are adduced.*

**Key words:** laser system for energy transmission, marker system, shape recognition system.

**Введение:** Активное развитие систем беспроводной передачи электрической энергии (БПЭ) связано с перспективой создания систем дистанционного энергоснабжения робототехнических устройств различного назначения, беспилотных летательных аппаратов, а в более отдалённой перспективе — для передачи энергии из космоса на Землю. Проведён ряд работ по длительному электроснабжению подвижных объектов [1], а также разработан ряд концептов космических солнечных электростанций [2].

В РКК "Энергия" (г. Королёв) разрабатывается космическая система БПЭ ИК-излучением, а также исследуется возможное наземное применение электроснабжения удалённых объектов — от датчиков до автономных летательных аппаратов. Ключевыми элементами технологии являются эффективные приёмники и источники излучения, узкие лазерные пучки и система наведения. В зависимости от целевого назначения и базирования система, находящаяся в разработке, может обеспечивать потребителей электроэнергией на расстояниях от нескольких метров до десятка километров. Некоторые аспекты использования системы БПЭ рассмотрены в работе [3].

Одним из самых значимых параметров системы является коэффициент полезного действия и для достижения эффективности тракта БПЭ более 10 % необходимо качественное наведение на приёмник-преобразователь. Под наведением будем понимать прежде всего обнаружение и захват цели, позволяющие расположить большую часть пучка на приёмнике во время процесса передачи энергии. Важными показателями наведения являются: скорость обнаружения приёмника в полусфере; помехоустойчивость. Стоит отметить, что средние турбулентности на трассах до 10 км не вызовут сильных смещений энергетического пучка (дисперсия смещения 20 см пучка ИК-излучения с длиной волны 808 нм менее 3 см [4]).

**Система наведения в общем.** Рассматривается оптическая автономная система наведения. Ос-

нова метода — поиск в текущем изображении с камеры эталонного изображения приёмника. В простейшем случае эти сравнения осуществляются на плоскости наблюдения [5].

Сравнение текущего и эталонного изображений проводится с помощью функционала, который принимает экстремальное значение при совпадении положений этих изображений. В качестве устойчивых признаков (дескрипторов) алгоритм может использовать прямые линии, характеризуемые координатами конечных точек, соотношением светлой и тёмной сторон и т. п., и пятна, характеризуемые размерами, координатами, относительной плотностью по сравнению с фоном.

Допустим, что имеются $q$-мерное пространство признаков (координаты, форма, цвет и т. п.), вектор $X$, характеризующий текущее изображение, и вектор $X^*$ для эталонного изображения. Наиболее частой формой оценки является минимум нормы разности этих векторов. Для безразмерных признаков используется сумма квадратов разности компонент:

$$\Delta X = (X - X^*)^T (X - X^*). \quad (1)$$

Образ принадлежит к классу эталонов $i$, если для любого $j$ из пространства эталонов верно:

$$(X - X_i^*)^T (X - X_i^*) < (X - X_j^*)^T (X - X_j^*). \quad (2)$$

Измерения ведутся на фоне шумов, поэтому границы объектов размыты, оценки классов становятся неточными. Это значит, что распознавание носит вероятностный характер.

**Маркерные системы.** В различных областях жизнедеятельности и современной техники часто возникает необходимость в измерении координат объектов, как подвижных, так и статичных, а также в получении данных об их характеристиках (например, форме, ориентации, дополнительных свойствах, внутренней информации) на дистанциях от десятков километров до долей метра. Упростить обнаружение объекта может установка на нём специальных ответных устройств (маркеров), анализ и выбор которых означает определение $q$-мерного пространства признаков для поиска эталона на текущем изображении.

Выбор маркеров зависит от условий применения, от характерных расстояний и т. п. К ориентирам систем технического зрения для считывания штрихкода и для систем сопровождения самолетов предъявляются совершенно различные требования. На практике выбор маркеров для значительных расстояний с возможностью работы в любых погодных условиях, особенно в условиях недостаточной освещённости, становится сложной задачей. Проведён анализ использования различных маркеров наведения в системе БПЭ для уличного наземного экспериментального макета с характерным расстоянием 1 км.

В качестве отдельных маркеров использовались графические объекты, катафоты, уголковые отражатели, светодиоды (рис. 1). Шаблоны использовались круглой формы, так как для отдельного ориентира ориентация не важна. Для такой формы также легко определяется центр при наличии помех. Внутренняя площадь изображения круглой формы минимальна для любого маркера той же площади, что позволяет увеличить площадь приёмника, занятую фотоэлектрическими преобразователями [6].

*Графический объект* (см. рис. 1, *а*). Главные недостатки такого маркера заключаются в зависимости дальности видимости от размеров и необходимости благоприятных светотехнических условий. Площадь маркера $S_г = 50$ см$^2$, внешними источниками не освещается. Будем считать, что мощность падающего солнечного излучения $P = 1$ кВт/м$^2$.

*Катафот и уголковый отражатель* (см. рис. 1, *б, в*). Использование отражающих поверхностей позволяет работать независимо от времени суток при условии подсветки этих поверхностей со стороны наблюдателя, а также повышает яркость ориентиров в условиях слабого освещения. Уголковые отражатели являются наиболее эффективным элементом для подсветки, так как возможна подсветка объекта под любыми углами. Стоит отметить возможность создания отражателей и источников подсветки в определённом спектре,

*а*) *б*) *в*) *г*)

**Рис. 1. Используемые маркеры:**
*а* — графический объект; *б* — катафот; *в* — уголковый отражатель; *г* — светодиод

что позволит чётко отделять это излучение от фона. Наиболее простым вариантом отражающего маркера является устройство типа "катафот" (состоит из множества маленьких уголковых отражателей). Площадь катафота $S_к = 16$ см$^2$ (из них на отражение работает половина), точность световозвращения 1°. Площадь уголкового отражателя $S_{уо} = 4$ см$^2$, точность световозвращения — дифракционная. Оба маркера освещались лазерным источником (мощностью $P_л$ = 20 мВт, длина волны $\lambda_л = 527$ нм, угол расходимости $\alpha_л = 1$ мрад, площадь пятна излучения в районе маркеров $S_{лп} = 1$ м$^2$). Стоит отметить, что лазерное излучение силового канала в системе БПЭ также будет отражаться обратно. Чтобы избежать возвращения мощного излучения необходимо ставить на отражатели полосовые светофильтры.

*Светодиод* (см. рис. 1, *г*). Этот вариант позволил проводить эксперименты в любых условиях, но потребовал специального оборудования для маркера (слабо расходящийся светодиод и питание). "Читаемость" маркера зависит лишь от мощности и расходимости излучения. Использование камеры, настроенной на приём конкретного излучения, позволит ослабить или совсем исключить влияние фонового излучения. Таким образом, детекция маркера не будет зависеть от времени дня. Главный недостаток такой системы — невозможность наблюдать маркер в широком диапазоне углов, излучение от источника будет видно только в узком конусе определённого направления. Расширение конуса увеличивает мощность излучателей для обеспечения той же яркости, что часто невозможно. Использовался светодиод с мощностью излучения $P_д = 100$ мВт, длиной волны $\lambda_д = 525$ нм и углом расходимости $\alpha_д = 13°$. Площадь излучающей области светодиода менее 1 см$^2$ (будем считать при расчётах 1 см$^2$).

**Анализ возможности обнаружения отдельного маркера.** Для проведения расчёта возможностей обнаружения приведённых выше маркеров на расстоянии 1 км использовались параметры стандартной камеры и оптической системы для технического зрения (число пикселей 1280 × 1024; размер пикселя 4,65 × 4,65 мкм; размер сенсора 5,95 × 4,95 мм; частота кадров $f_к = 15$ к/с; чувствительность матрицы $P_{пор} = 6 \cdot 10^{-4}$ Вт/м$^2$; диаметр приёмного объектива $D_{зр.вх}$ 100 мм; угол зрения объектива $W_x = 0{,}3°$). При освещении отражающих маркеров излучением лазера источник крепился на объектив, так что расстояние между осью излучения и краем объектива было не более 2 см.

Необходимым условием обнаружения является требование $E \geqslant \mu_\varphi E_{пор}$, где $E$ — энергия излучения, приходящая на сенсор приёмника; $\mu_\varphi$ — отношение сигнал/шум.

Энергия сигнала, приходящая на приёмник определяется по формуле:

$$E = E_0 \tau_а \tau_{пр} \frac{S_1}{S_2}, \qquad (3)$$

где $E_0$ — энергия, излучаемая или отражаемая маркерной системой за 1 кадр камеры; $\tau_а$ — коэффициент пропускания атмосферы на расстоянии $L = 1000$ м (примем 0,9); $\tau_{пр}$ — коэффициент пропускания оптики приёмного канала (примем 0,75); $S_1$ — площадь входного зрачка оптики приёмного канала, на которую попадает излучение; $S_2$ — площадь пятна излучения излучаемого или отражённого маркером в плоскости входного зрачка оптики приёмного канала — приёмная плоскость.

Рассчётные значения $E_0$ для разных маркеров приведены в табл. 1.

На первый взгляд, графический объект возвращает в сторону наблюдателя гораздо большее количество энергии, а уголковый отражатель на 6 порядков меньше. Но для различных маркеров различны расходимости отражённого излучения, так графический объект отражает в 180°, а уголковый отражатель — в узкий угол менее 1°. Поэтому более важной характеристикой для маркера является плотность излучения.

Для качественного обнаружения маркера размер его изображения на сенсоре камеры должен быть больше 1 пикселя. Примем его минимальный размер равным 3 пикселям. Минимальный характерный размер маркера определяется по формуле:

$$l = \frac{l_{3px}}{f_{об}} L = \frac{l_{3px} W_x}{l_x} L, \qquad (4)$$

где $l_{3px}$ — размер трёх пикселей на сенсоре камеры; $f_{об}$ — фокусное расстояние объектива; $L$ — расстояние от приёмной плоскости до маркерной системы; $W_x$ — угол зрения объектива; $l_x$ — длина половины диагонали сенсора камеры.

Таблица 1

**Энергия сигнала от маркерных систем, Дж**

| Графический объект | Уголковый отражатель | Катафот | Светодиод |
|---|---|---|---|
| 0,3 | $5 \cdot 10^{-7}$ | $10^{-6}$ | $7 \cdot 10^{-3}$ |

Тогда для системы с описанными выше параметрами минимальный размер маркера 22 мм. Все выбранные маркеры, кроме светодиода, удовлетворяют этому требованию. Изображение светодиода будет иметь размер 1 пиксель.

Размер освещённой области на приёмной плоскости определяется углом расходимости излучения от маркера. Значения рассчитаны с учётом дифракционной расходимости и атмосферного уширения для разных типов маркеров и представлены в табл. 2.

Центром освещённой области в случае отражателей является лазерный источник, но радиус области может быть такой, что только часть сигнала попадает в объектив камеры (рис. 2). Поэтому необходимо источник располагать как можно ближе к объективу, что также является проблемой использования уголковых отражателей на небольших расстояниях (чем меньше расстояние — тем меньшего размера должен быть уголковый отражатель).

Оценим часть сигнала, попадающую в объектив при радиусе пятна $R = 6{,}5$ см; радиусе объектива $r = 5$ см; расстоянии между центрами $D = 7$ см. Таким образом, $S_1 = 0{,}21\ S_{\text{пятна}}$, т. е. лишь 0,21 от энергии отражённого сигнала попадает на сенсор.

Тогда согласно выражению (3) определим энергию сигнала на сенсоре и плотность энергии на пикселе с учётом размера изображения маркера. Пороговая чувствительность камеры за время кадра около $4 \cdot 10^{-5}$ Дж/м$^2$. Расчётные плотности энергии на 1 пикселе за 1 кадр для разных маркеров, рассчитанные по формуле $e_{\text{р}} = \dfrac{E}{S_{px}}$, представлены в табл. 3.

Важной характеристикой любой аппаратуры, которая принимает внешние сигналы, является

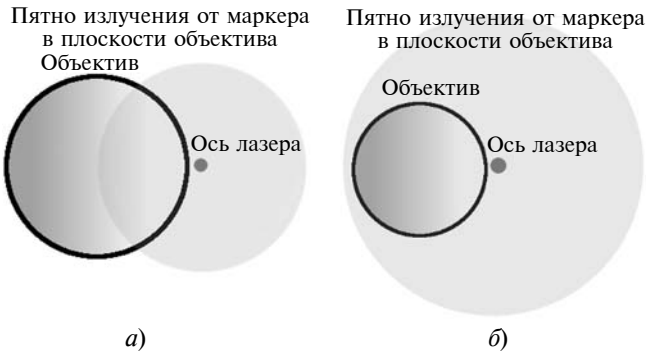



**Рис. 2. Взаимное положение объектива и отражённого от уголкового отражателя лазерного излучения в приёмной плоскости:**
*а* — расстояние 1 км; *б* — расстояние 2 км

Таблица 2

**Геометрические характеристики сигнала от маркерных систем**

| Характеристика \ Маркер | Графический объект | Уголковый отражатель | Катафот | Светодиод |
|---|---|---|---|---|
| Угол расходимости, ° | 150 | $74{,}5 \cdot 10^{-4}$ | 0,1 | 13 |
| Площадь на приёмной плоскости, м$^2$ | $4{,}4 \cdot 10^{7}$ | $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ | 2,4 | $4{,}1 \cdot 10^{4}$ |

Таблица 3

**Плотность энергии на 1 пикселе за 1 кадр**

| Графический объект | Уголковый отражатель | Катафот | Светодиод |
|---|---|---|---|
| $3{,}8 \cdot 10^{-2}$ | 1320 | 7,2 | 29,7 |

Таблица 4

**Коэффициент запаса плотности энергии в изображении**

| Графический объект | Уголковый отражатель | Катафот | Светодиод |
|---|---|---|---|
| $9{,}6 \cdot 10^{2}$ | $1{,}9 \cdot 10^{7}$ | $1{,}8 \cdot 10^{5}$ | $7{,}4 \cdot 10^{5}$ |

отношение сигнала к уровню чувствительности. В случае изображения на матрице таким параметром считают отношение $n = \dfrac{e_{\text{р}}}{e_{\text{р}_{\text{пор}}}}$, которое определяет запас (недостаток) плотности энергии в изображении объекта. Значения коэффициента запаса для рассматриваемых маркеров представлены в табл. 4.

Коэффициент рассчитан без учёта фона и при минимальном затухании в атмосфере (в случае тумана или дождя, затухание может вырасти на 3—4 порядка на 1 км трассы). Больше всего это скажется на системах, использующих лазерную подсветку, так как излучение от подсветки проходит двойной путь.

Для сравнения (см. табл. 3), а также для оценок фона примем энергию солнечного излучения, попадающую на 1 м$^2$ поверхности за 1 кадр рассматриваемой камеры 67 Дж (в терминах плотности излучения 67 Дж/м$^2$). Отсюда видно, что использование графических маркеров на расстояниях около 1 км не представляется возможным, использование уголкового отражателя гарантирует превышение энергии сигнала над энергией падающего солнечного излучения (фон) в 10 раз, катафот и светодиод могут быть различимы на

фоне, хотя и не так явно, как уголковый отражатель. Использование подходящего под длину волны полосового светофильтра на камере позволяет как минимум на порядок ослабить фон, что значительно улучшает видимость уголкового отражателя, катафота и светодиода.

Проведено исследование по использованию различных маркеров на расстояниях до 1 км (рис. 3), в ходе которого моделировалось поведение отражённого излучения. Условия моделирования — это постоянный угол зрения объектива камеры, а также одинаковый размер пятна луча лазера, подсвечивающего мишень. Значения параметров использовались те же, что были описаны выше [7].

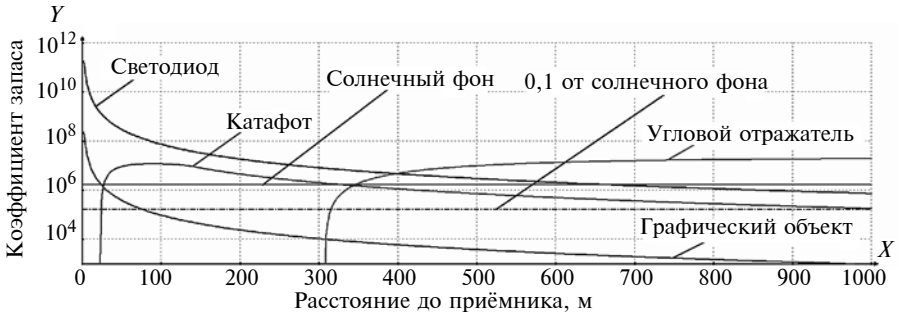



**Рис. 3. Зависимость коэффициента запаса энергии сигнала маркера от расстояния**

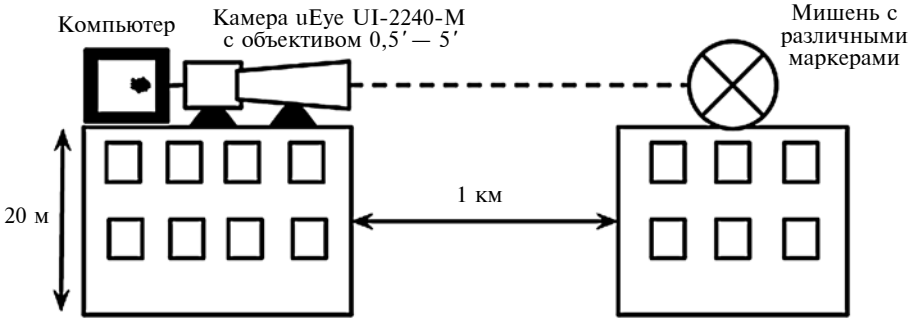



**Рис. 4. Принципиальная схема эксперимента**

На рис. 3 видны достаточно резкие спады для сигналов от катафота и уголкового отражателя. Это прежде всего связано с тем, что отражённое излучение попадает не на весь объектив, а лишь в его часть.

**Анализ полученных результатов.** Любые значения коэффициента запаса ниже 0,1 солнечного фона характеризуют низкую возможность обнаружения этого маркера практически в любых условиях. Область между солнечным фоном и 0,1 солнечного фона можно считать удовлетворительной при хороших погодных условиях. Значения выше солнечного фона благоприятны для обнаружения маркера в сложных погодных условиях.

Таким образом, можно выделить расстояния, подходящие для использования маркеров:

графический объект — до 10 м;

катафот — от 30 до 200 м;

уголковый отражатель — от 400 до 1000 м;

светодиод — до 400 м.

Нижнюю границу по дальности области применения уголковых отражателей можно опустить благодаря уменьшению размеров уголкового отражателя. При этом падает энергия сигнала. Однако создание маркерной системы на основе уголковых отражателей для расстояний от 100 до 1000 м возможно с использованием уголковых отражателей площадью менее 1 см$^2$.

**Эксперименты.** Проведена серия подтверждающих экспериментов, в качестве объектива использовался трансфокатор, а в качестве лазера — лазерная указка с изменяемым углом расходимости. Таким образом, условия были идентичны условиям теоретической модели. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 4. Основным детектирующим элементом в системе была камера *uEye IDS* 2240 (её характеристики брались для расчётов), подключенная к зрительной трубе *Yukon* 100*x* (диаметр входного зрачка 100 мм, углы обзора от 0,5' — 5'). Маркеры обнаруживались на экране компьютера либо сразу визуально, либо после простейшей обработки изображений. Наблюдательная часть оборудования находилась на крыше одного здания, на высоте около 20 м над землёй, мишени с маркерами находились на крыше другого здания, удалённого от первого на 1 км, на той же высоте.

Основная цель экспериментов — подтверждение возможности обнаружения различных маркеров на расстоянии 1 км (рис. 5).

Графический объект, как и ожидалось, совершенно неразличим на расстоянии 1 км. Светодиоды хорошо себя зарекомендовали даже в плохую погоду. Однако некоторые трудности представляет необходимость направлять светодиод строго в сторону приёмной оптики. Уголковый отражатель не самый яркий маркер. В ходе эксперимента область, в которой находятся маркеры, освещалась излучением лазерной указки, моменты попадания излучения на уголковый отражатель чётко фиксировались на изображе-

*а*) *б*) *в*)

**Рис. 5. Результаты эксперимента использования маркеров различных типов на 1 км:**
*а* — слабый светодиод и графический объект; *б* — группировка ярких светодиодов; *в* — один уголковый отражатель, освещаемый лазерной указкой

нии. Таким образом, экспериментально показана возможность обнаружения светодиодов и уголковых отражателей на расстояниях около 1 км, и невозможность обнаружения графического объекта, что и предсказывалось моделью (см. рис. 3).

**Группировки ориентиров.** Использование группы маркеров упрощает задачу определения ориентации мишени, повышает помехоустойчивость. Маркеры могут быть различных типов, так, например, часто используются мигающие светодиодные лампочки, а в центральной части маркера располагают уголковые отражатели. Дополнительные ориентиры можно использовать для дублирования, создания избыточности информации, что позволит избежать ошибок распознавания при перекрытиях и сильных искажениях. Основная проблема использования группы маркеров — это увеличение общей площади, которую они занимают, и увеличение времени, требуемого на обработку маркеров.

**Построение итоговой маркерной схемы для наведения системы БПЭ.** Чтобы определиться с признаками маркерной системы, необходимо обозначить цели, которые она должна преследовать. Разрабатываемая система — это прежде всего вспомогательная аппаратура в системе БПЭ, основная цель которой обеспечить высокую точность наведения и низкие потери энергии в ходе передачи на удалённый приёмник (потери, связанные с неидеальностью наведения, не более 5 %).

Основные требования к обнаружению:

универсальность (возможность использования на любом приёмнике);

область применения от 100 до 1000 м (заявленные дальности в готовящихся демонстрациях по БПЭ);

рабочие углы $\pm 30^\circ$ между плоскостью приёмника и осью камеры (углы эффективной работы фотопреобразователя);

линейные размеры приёмника, на котором должна располагаться маркерная система, не более 25 см;

низкое энергопотребление;

точность указания направления на центр приёмника не хуже 50 мкрад;

помехоустойчивость;

отсутствие помех со стороны излучения БПЭ;

работа системы обнаружения не должна влиять на другую аппаратуру системы БПЭ;

достаточная простота (гарантирует скорость обработки).

Исходя из приведённых выше результатов исследования, выбрана система, состоящая из уголковых отражателей (каждый отдельный отражатель имеет площадь 9 см$^2$ с наложенной маской, делящей плоскость на 16 равных частей — для увеличения угла расходимости и возможности работы на 100 м). Для защиты системы БПЭ от отражённого излучения лазера, который используется для передачи энергии, отдельные уголковые отражатели должны иметь полосовой фильтр, пропускающий лишь излучение подсветки.

Для соответствия требованию помехоустойчивости, но при этом достаточной простоте, влияющей на скорость обработки, выбран вариант трёх уголковых отражателей, расположенных в вершинах равностороннего треугольника.

Анализ указанных выше требований для системы из трёх уголковых отражателей позволил определить 7-мерное пространство признаков эталонного изображения маркерной системы (см. формулы (1) и (2)). Выбраны следующие признаки: $\Delta$ — равенство трёх сторон (сторона соединяет центры окружностей, описанных около

изображений отдельных уголковых отражателей); Ω — круглая форма изображения одиночного уголкового отражателя; β — градиент яркости между фоном и изображением уголкового отражателя; $l$ — длина стороны треугольника; $S$ — площадь изображения уголкового отражателя; $C$ — связность множества точек в изображении уголкового отражателя; $H$ — отсутствие внутренних контуров, для множества точек в изображении уголкового отражателя.

Некоторые из признаков можно объединить в векторные или сложные, так что итоговая система сравнения изображения с эталоном (2) имеет четыре признака.

Первый признак — поиск ярких связных групп пикселей:

$$A_j = \sum_{x=1}^{nx} \sum_{y=1}^{ny} p_{x,y}(\beta > 150 + \beta) \text{ и } A_j \text{ — линейно-связное,} \quad (5)$$

где $p_{x,y}$ — точка изображения — пиксель; $A_j$ — множество точек, являющееся изображением отдельного уголкового отражателя; $nx$ — количество пикселей в полном изображении камеры по горизонтали; $ny$ — количество пикселей в полном изображении камеры по вертикали; β — яркость точки (0—255); $\beta = \frac{\sum_{x=1}^{nx} \sum_{y=1}^{ny} \beta_{p_{x,y}}}{nxny}$.

Второй признак — отбор по площади, занимаемой яркими точками:

$$4px < |A_j| < 100px, \quad (6)$$

где $|A_j|$ — мощность множества, т. е. площадь изображения отдельного уголкового отражателя (количество пикселей); $px = \frac{0{,}5(nx + ny)d}{2L\mathrm{tg}\frac{W_x}{2}}$; $d$ — характерный размер уголкового отражателя; $L$ — характерное расстояние до цели; $W_x$ — угол обзора объектива камеры.

Третий признак — отбор по форме множества ярких точек:

$$0{,}05 < \frac{|\partial A_j|^2}{|A_j|} < 0{,}3, \quad (7)$$

где $\partial A_j$ — граница множества $A_j$; $\frac{|\partial A_j|^2}{|A_j|}$ — отношение квадрата периметра изображения к площади изображения.

Четвёртый признак — поиск трёх равноудалённых друг от друга множеств ярких точек среди всех множеств, которые удовлетворили предыдущим трём признакам:

$$\exists k_1, k_2, k_3 \in J,\ 17px < C_{k_l} - C_{k_n} < 37px,\ \forall l, n \in (1, 2, 3), \quad (8)$$

где $J$ — множество всех $j$ ($j$ — номер изображения уголкового отражателя); $C_m$ — центр тяжести $m$-го изображения уголкового отражателя.

Четвёртый признак является последним, и в случае выполнения поставленного условия (8) считается, что система маркеров обнаружена, т. е. нашлись такие три изображения уголковых отражателей, что расстояния между центрами тяжести любых двух из них не более 37$px$ и не менее 17$px$.

Алгоритм, проверяющий эти признаки, реализован и протестирован на экспериментальных образцах (рис. 6).

Для трёх различных экспериментов алгоритм, основанный на выбранных признаках, показал успешную работу для обнаружения имитатора приёмника, с установленной на нём маркерной системой с уголковыми отражателями, на расстояниях от 50 до 150 м.

**Заключение.** Для обнаружения приёмников-преобразователей тракта БПЭ в условиях нетурбулентной атмосферы на расстояниях до 1 км рассмотрены различные маркерные системы на основе графических объектов, светодиодов и отражателей. Проведён анализ возможности об-

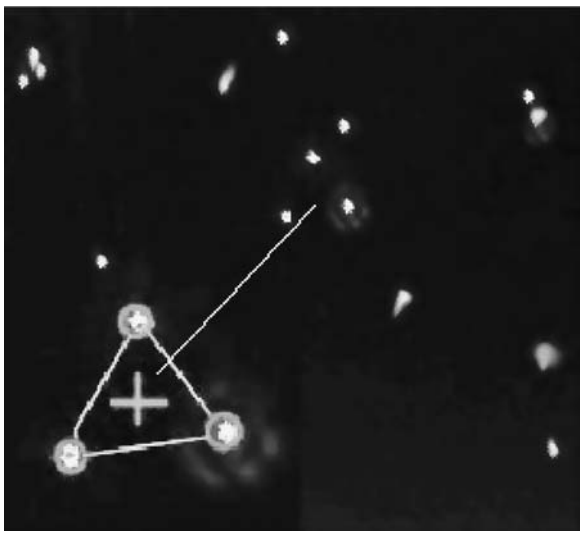


**Рис. 6. Результат работы алгоритма на тестовой мишени, обнаружение маркерной схемы, состоящей из трёх равноудалённых уголковых отражателей**

наружения отдельных элементов маркерной схемы, результаты которого проверены на экспериментах. В качестве подходящего варианта выбрана схема с тремя уголковыми отражателями. Продемонстрирована работа алгоритма обнаружения подобной маркерной схемы.

***Библиографические ссылки***

1. **Blackwell Tim.** Recent Demonstrations of Laser Power Beaming at DFRC and MSFC. Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion, ISSN 0094-243X, N. 766. 2004. P. 73—85.

2. **Нагатомо М., Сасаки С., Наруо Й., Ванке В.А.** Работы института космических исследований Японии в области космической энергетики // Успехи физических наук. 1994. Т. 164, № 6. С. 631 — 641.

3. **Грибков А.С., Евдокимов Р.А., Синявский В.В., Соколов Б.А., Тугаенко В.Ю.** Перспективы использования беспроводной передачи электрической энергии в космических транспортных системах // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 2. С. 118—123.

4. **Прохоров А.М., Бункин Ф.В., Гочелашвили К.С., Шишов В.И.** Распространение лазерного излучения в случайно-неоднородных средах // Успехи физических наук: Т. 114, Вып. 3. Наука. 1974. С. 415—454.

5. **Бахшиян Б.Ц., Назиров Р.Р., Федяев К.С.** Точность оценивания координат реперных знаков на неподвижной цели по измерениям бортового оптического датчика // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами 2010: Труды научно-техн. конф.-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 317—327.

6. **Johannes Köhler, Alain Pagani, Didier Stricker.** Detection and Identification Techniques for Markers Used in Computer Vision. Visualization of Large and Unstructured Data Sets — IRTG Workshop, 2010.

7. **Капранов В.В., Тугаенко В.Ю.** Маркерные системы в техническом зрении для задач обнаружения объектов в атмосфере на расстояниях до 1 км // Приборы. 2013. № 10. С. 16—21.

УДК 621.384.658

**В.А. Шахнин,** д-р техн. наук, проф., **Ю.С. Чебрякова, Я.В. Мироненко**
(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)
vshakhnin@rambler.ru

# АППАРАТНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ИНТРОДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Разработана установка для аппаратного анализа спектральной плотности электрических шумов, вызванных частичными разрядами (ЧР-шумов) в изоляции силового однофазного автотрансформатора. Рассмотрены особенности экспериментального исследования статистических характеристик ЧР-шумов в изоляции высоковольтного оборудования. Предложена математическая модель спектрального распределения ЧР-шумов, предназначенная для интродиагностики высоковольтного оборудования.*

**Ключевые слова:** аппаратный анализ, высоковольтное оборудование, электрошумовые методы, частичные разряды, случайный импульсный процесс.

*Facility for the hardware analysis of the electric noise spectral density caused by partial categories (PC-noise) in isolation of the power single-phase autotransformer is developed. Experimental research features of the statistical characteristics of PC-noise in the high-voltage equipment isolation are considered. The mathematical model of the PC-noise spectral distribution intended for a high-voltage equipment introdiagnostics is proposed.*

**Key words:** hardware analysis, high-voltage equipment, electronoise methods, partial categories, casual pulse process.

Важнейшей особенностью современного этапа развития средств диагностики высоковольтного оборудования является переход от концепции регламентных ремонтов к ресурсо- и энергосберегающей концепции обслуживания на основе мониторинга технического состояния [1]. Эффективность такого перехода в значительной мере определяется возможностями применяемых методов и средств диагностики. Безусловно, наиболее перспективны методы интродиагнос-

тики, т. е. диагностики под рабочим напряжением без вывода оборудования из эксплуатации для вскрытия баков и слива диэлектрических жидкостей. К их числу относятся методы анализа разрядных процессов в изоляции. Физической основой большой группы этих методов являются частичные разряды (ЧР), т. е. микропробои, перекрывающие лишь небольшую часть изоляции. ЧР возникают в результате действия множества факторов: особенностей структуры изоляции, уровня напряжённости электрического поля, наличия неоднородностей в нём, температуры, изменений химического состава изоляции и ряда других. Это является важной предпосылкой того, что процесс возникновения ЧР с позиций теории вероятностей можно рассматривать как *стационарный или периодически нестационарный случайный импульсный процесс,* а для математического анализа и моделирования ЧР при диагностике высоковольтного оборудования целесообразно применить соответствующий математический аппарат. Несмотря на очевидность изложенного выше, в научно-технической литературе отсутствует анализ статистических характеристик ЧР, которые наряду с традиционными, могут содержать диагностическую информацию о состоянии изоляции высоковольтных аппаратов. В значительной степени это обусловлено отсутствием средств и методик аппаратного анализа статистических характеристик ЧР в изоляции эксплуатируемого высоковольтного оборудования. Рассмотрим наиболее важные характеристики, обратив особое внимание на их диагностическую информативность и возможности автоматического аппаратного анализа.

Случайный процесс изменения параметров ЧР в реальной изоляции высоковольтного оборудования не может происходить бесконечно быстро. Значения параметров электрического шума, вызванного ЧР, в разные моменты времени оказываются взаимосвязанными. Можно сказать, что ЧР-шум обладает памятью, которая является отражением физико-химических свойств изоляции и определяет внутреннюю структуру случайного процесса. Для его описания подходит автокорреляционная функция $K(\tau)$, характеризующая связь между значениями случайного процесса в два момента времени, разделённых некоторым интервалом $\tau$. Если интервал $\tau$ стремится к нулю, значения параметров в начале и конце интервала становятся одинаковыми, а автокорреляционная функция обращается в дисперсию шума: $K(0) = \sigma^2$. В противоположном случае, когда интервал $\tau$ неограниченно возрастает, значения флуктуаций становятся взаимно независимыми и, следовательно, автокорреляционная функция стремится к нулю. Диагностическим признаком состояния изоляции может служить время корреляции шума $\tau_K$, определяющее продолжительность временного интервала, на котором значение автокорреляционной функции существенно отличается от нуля. Иными словами, это время, в течение которого сохраняется информация о начальном значении процесса. Таким образом, автокорреляционная функция является важной диагностической характеристикой при оценке состояния изоляции высоковольтного оборудования, однако её инструментальное определение представляет определённые сложности. Более удобной для аппаратного анализа статистической характеристикой ЧР-шумов является спектральная плотность $S(f)$, т. е. функция, характеризующая распределение интенсивности флуктуаций по частоте. Согласно теореме Винера—Хинчина автокорреляционная функция и спектральная плотность стационарного случайного процесса взаимно связаны преобразованием Фурье [2]. Поэтому автокорреляционная функция и спектральная плотность в равной мере описывают изменчивость случайного процесса во времени. Действительно, чем шире диапазон частот шума, тем быстрее изменяется значение флуктуирующей переменной, и тем быстрее процесс "забывает" своё начальное состояние, т. е. с расширением частотного диапазона электрического шума $\Delta f$ время корреляции $\tau_K$ уменьшается. Для всех процессов с одинаковой формой спектра и, следовательно, с автокорреляционной функцией одного вида произведение $\Delta f$ и $\tau_K$ является некоторой константой.

Рассмотрим некоторые особенности аппаратного анализа спектральной плотности шума, обусловленного ЧР в диагностируемом высоковольтном оборудовании. ЧР представляют собой микропробои с кажущимся зарядом в диапазоне от десятых долей до десятков нанокулон. Очевидно, что для надёжного определения характеристик шума, вызванного незначительным изменением электрического состояния изоляции, требуется существенное усиление выходного сигнала датчика ЧР. Присутствие в этом сигнале наряду с шумом (сплошная компонента спектра) гармонических составляющих рабочего напряжения и высокочастотных наводок (дискретные компоненты спектра) создаёт большие экспериментальные трудности в процессе измерений.

Дело в том, что интенсивность составляющих, соответствующих дискретной компоненте спектра, обычно существенно выше интенсивности ЧР-шума. Это может вызвать, например, нарушение линейного режима работы предварительного усилителя. Значительно уменьшить уровень дискретных составляющих удаётся благодаря встречному включению двух идентичных датчиков ЧР, расположенных по разные стороны относительно оси симметрии диагностируемого аппарата на одинаковых расстояниях от неё. Исследования показывают, что параметры ЧР в двух достаточно удалённых друг от друга областях диэлектрика слабо коррелированы между собой и, следовательно, спектральные плотности шумов при таком включении датчиков складываются. Также целесообразно применение различных схем амплитудной и фазовой компенсации.

Для анализа частотного распределения шума необходим перестраиваемый избирательный фильтр. Эффективная ширина полосы пропускания фильтра должна быть достаточно мала по сравнению с деталями анализируемого спектра. Обычно ширина полосы составляет единицы или десятки герц. В этом случае спектральная плотность электрического шума неизменна в пределах эффективной полосы пропускания избирательного фильтра. Для получения сигнала, пропорционального измеряемой спектральной плотности, применяется квадратичный детектор, подключаемый к выходу избирательного фильтра. Постоянная составляющая выходного напряжения детектора определяется спектральной плотностью электрического шума. Для её выделения применяется низкочастотный фильтр. Схема установки для измерения спектральной плотности ЧР-шума в диагностируемом высоковольтном аппарате (однофазный автотрансформатор типа АОДЦТН-417000/750/500-У1) приведена на рис. 1. Обмотки высокого, среднего и низкого напряжения обозначены соответственно *HW*, *MW*, *LW*.

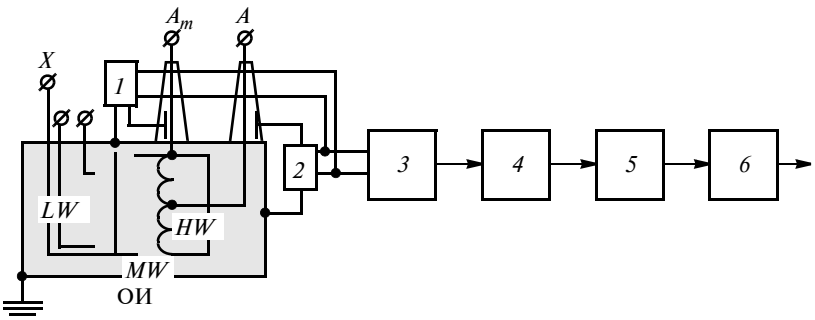



**Рис. 1. Схема установки для измерения спектральной плотности ЧР-шума при диагностике однофазного автотрансформатора**

Датчики ЧР *1* и *2* включены в специально созданные цепи между измерительными электродами высоковольтных вводов обмоток высокого и среднего напряжения ($A$ и $A_m$) и заземлённым корпусом объекта исследования (ОИ). В качестве датчиков используются торы Роговского, обмотки которых соединены встречно и подключены ко входу измерительного усилителя *3*, последовательно с которым включены перестраиваемый избирательный фильтр *4*, квадратичный детектор *5* и низкочастотный фильтр с большой постоянной времени *6*. Недостатком установки является то, что она, позволяя при достаточно узкой полосе избирательного фильтра измерять спектральную плотность электрического шума вблизи к дискретной линии спектра, не обеспечивает возможности измерять эту характеристику непосредственно на частоте дискретной составляющей. Это объясняется тем, что даже тщательная компенсация и экранирование не снижают уровень гармоник до уровня шумов. Покажем, что этот недостаток можно устранить, включив между избирательным фильтром и квадратичным детектором последовательно соединённые детектор, работающий в линейном режиме, и низкочастотный усилитель.

Пусть эффективная полоса пропускания избирательного фильтра существенно меньше диапазона частот между линиями спектра, и в полосу может попасть только одна гармоническая компонента. В этом случае сигнал на выходе избирательного фильтра состоит из синусоидального напряжения $e_c(t)$, амплитуда которого пропорциональна спектральной амплитуде, соответствующей дискретной линии спектра, и шумового напряжения $u(t)$. Последнее слагаемое является случайной величиной с нормальным законом распределения вероятностей. Это подтверждается многочисленными экспериментами [3, 4] и соответствует центральной предельной теореме теории вероятностей. Суть теоремы заключается в том, что случайная величина, являющаяся результатом (суммой) множества случайных факторов, при отсутствии доминирования одного или нескольких из них имеет распределение, близкое к нормальному [2]. Для рассматриваемого случая справедливо неравенство

$$E_c > \sigma_u, \qquad (1)$$

где $E_c$ — действующее значение синусоидальной составляющей; $\sigma_u^2 = u^2$ — среднеквадратическое значение шумовой составляющей.

С учётом нормальности распределения шумовой составляющей при соблюдении условия (1) справедливы следующие соотношения:

$$i_0 = \alpha E_c,\ \overline{i_ш^2} = \beta \sigma_u^2,$$

где $i_0$ — постоянная составляющая выходного тока линейного детектора; $\overline{i_ш^2}$ — среднеквадратическое значение флуктуаций низкочастотных составляющих; $\alpha$ и $\beta$ — постоянные коэффициенты, зависящие от крутизны характеристики детектора.

Таким образом, измеряя $i_0$, можно определить амплитуду спектральной линии, а измеряя $\overline{i_ш^2}$ с помощью квадратичного детектора — спектральную плотность шума, которая пропорциональна $\sigma_u^2$. Несмотря на возможность измерять описанным методом шумы непосредственно на дискретной линии, эта задача остаётся трудной из-за требования высокой степени компенсации дискретных линий на входе анализатора спектра. Большинство экспериментальных работ посвящено исследованию спектра между линиями или вблизи них. Абсолютное значение спектральной плотности шума, вызванного ЧР, определяется при калибровке измерительной установки по сигналу эталонного генератора белого шума с известной спектральной плотностью.

Анализ результатов экспериментальных исследований ЧР-шумов в масляной изоляции автотрансформатора на установке, представленной на рис. 1, а также результатов подобных исследований для других видов изоляции [4] позволяет представить общую картину спектрального распределения интенсивности шумов в виде графика, изображенного на рис. 2. На кривой спектрального распределения выделены две характерные частоты $\omega_1$ и $\omega_2$, выше и ниже которых наблюдается спад кривой спектральной плотности.

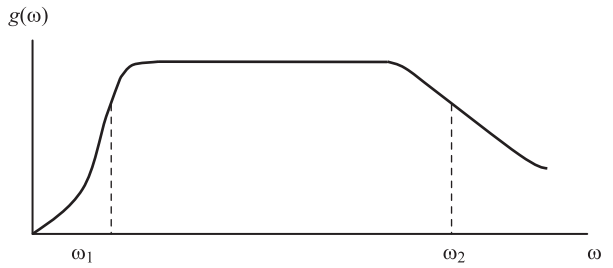



**Рис. 2. Спектральное распределение электрического шума**

Между этими частотами находится область стабилизации спектральной плотности. Значение частоты $\omega_1$ обычно увеличивается с ростом частоты приложенного напряжения $\omega_0$, в то время как значение $\omega_2$ практически не зависит от $\omega_0$, а определяется физическими свойствами диэлектрика. В зависимости от состояния изоляции область стабилизации может быть слабо или ярко выраженной. В последнем случае кривая $g(\omega)$ имеет довольно острый максимум. Таким образом, возможно использование параметров спектрального распределения ЧР-шумов в качестве диагностических признаков при обследовании высоковольтного оборудования. Для реализации этой возможности необходима разработка математической модели взаимосвязи спектрального распределения $g(\omega)$ с параметрами ЧР в диагностируемом диэлектрике. Следует отметить, что одно и то же спектральное распределение может соответствовать различным флуктуационным процессам и адекватный выбор той или иной модели — это в конечном счёте вопрос эксперимента. В настоящий момент нет достаточно полной картины флуктуационных процессов при ЧР в изоляции высоковольтных аппаратов. Однако можно сделать некоторые замечания в пользу выбора той или иной модели. Дальнейший анализ проведём, базируясь на следующих положениях. Во-первых, будем рассматривать шумы, вызванные ЧР под действием рабочего напряжения высоковольтных аппаратов, и считать, что постоянные времени изменения электрических величин, сопровождающих ЧР, много меньше периода изменения электрического поля $T_0$ = 20 мс. Другими словами, полагаем, что динамика процессов при циклическом изменении электрического поля с частотой 50 Гц совпадает с динамикой квазистатического изменения поля. Во-вторых, считаем, что каждому из процессов ЧР соответствует своя компонента в сигнале датчика ЧР, а именно, обратимым процессам соответствуют компоненты, изменяющиеся в такт с изменением внешнего электрического поля, а необратимым скачкам соответствуют импульсные компоненты, средняя длительность которых $\overline{\vartheta} < T_0$.

Наиболее простым подходом к расчёту спектра ЧР-шума является рассмотрение задачи о наложении независимых импульсов. Предположим, что при равномерном изменении напряжённости внешнего электрического поля в диэлектрике возникает последовательность статистически независимых ЧР, каждый из

которых вызывает на выходе датчика импульсный сигнал

$$\upsilon_j(t) = a_j F_j(t - \Theta_j), \qquad (2)$$

где $a_j$ — амплитуда импульса; $F_j$ — функция, описывающая его форму; $\Theta_j$ — момент его возникновения.

Упрощая задачу, будем считать, что форма импульсов от всех ЧР в исследуемом диэлектрике за период изменения приложенного напряжения одинакова $F_j(t) = F(t)$, и вероятность $p$ возникновения импульса на интервале $dt$ пропорциональна длительности интервала: $p = n_1 dt$, где $n_1$ — среднее количество ЧР в единицу времени (пуассоновский процесс). Эта модель предполагает полную равноправность всех ЧР в диагностируемом аппарате, так что в процессе ЧР с равной вероятностью участвуют все локальные области диэлектрика, причём ЧР могут случайным образом заменять друг друга. Задача сводится к определению флуктуаций количества ЧР в единицу времени.

С учётом (2) выходной сигнал датчика ЧР можно описать следующей формулой:

$$u(t) = \Sigma_j \upsilon_j(t) = \Sigma_j a_j F(t - \Theta_j). \qquad (3)$$

Применяя теорему Кембелла [5], получим соответствующую сигналу (3) функцию корреляции

$$\psi(t) = n_1 a^2 \int_{-\infty}^{\infty} F(\Theta - t) F(\Theta) d\Theta. \qquad (4)$$

При вычислении на основе выражения (4) спектральной плотности выходного сигнала датчика ЧР целесообразно использовать известную формулу [2]

$$g(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \qquad (5)$$

Для этого, применяя преобразование Фурье, представим $F(t)$ в следующем виде:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{-i\omega\tau} d\tau.$$

В результате получим формулу для спектральной плотности

$$g(\omega) = 2\pi n_1 \overline{a}_2 |S(\omega)|^2, \qquad (6)$$

которая показывает, что спектр выходного сигнала датчика ЧР определяется спектром одиночного импульса $S(\omega)$.

Пусть форма одиночного импульса ЧР приближённо описывается функцией

$$F(t) = e^{-\lambda t} \ (t > 0). \qquad (7)$$

Тогда, применяя преобразования (3—6), получим формулу для спектральной плотности

$$g(\omega) = \frac{n_1 \overline{a}_2}{2\pi} \frac{1}{\lambda^2 + \omega^2}. \qquad (8)$$

На частотах $\omega^2 < \lambda^2$ формула (8) определяет практически постоянное значение спектральной плотности $g_0(\omega)$. На частоте $\omega^2 = \lambda^2$ спектральная плотность убывает вдвое, и эта частота может быть принята за верхнюю границу спада спектра электрического шума. Длительность импульса ЧР $\vartheta = 1/\lambda$ определяется физическими и химическими свойствами диэлектрика и внешними воздействиями. В твёрдой изоляции значения этого параметра лежат в диапазоне $10^{-9}$—$10^{-8}$ с, в жидкой и газовой — в диапазоне $10^{-7}$—$10^{-6}$ с. Если в выражении (6) положить $\sqrt{\overline{a}_2}$ равным средней амплитуде ЧР $a$, то значение спектральной плотности в области плато выражается формулой

$$g_0(\omega) = 2\pi n_1 a^2 |S(0)|^2. \qquad (9)$$

Пусть диэлектрик находится в однородном поле, которое создаётся приложенным синусоидальным напряжением с периодом $T_0$. На основании сделанного ранее предположения о равноправности всех ЧР в исследуемом диэлектрике можно написать: $n_1 = N_1/T_0$, где $N_1$ — полное количество ЧР, возникающих за период. Обозначим изменение напряжения на электродах изоляционного промежутка при ЧР через $\Delta U$. Тогда формула (9) примет вид

$$g_0(\omega) = \frac{1}{2\pi T_0} N_1 \overline{\Delta U^2}. \qquad (10)$$

Эксперименты показывают, что результаты вычисления спектральной плотности ЧР-шума в области плато по формуле (10) совпадают по порядку величины с результатами измерений $g(\omega)$ на установке, изображённой на рис. 1. Однако модель, рассмотренная выше, не позволяет объяснить низкочастотный спад спектральной плотности и наличия характерной частоты $\omega_1$. Можно предположить, что это связано с гипотезой о независимости ЧР. Учёт взаимодействия между отдельными ЧР формально сводится к тому, что для пуассоновского импульсного процесса рас-

пределение интервалов времени Θ между последовательными независимыми импульсами задается в виде экспоненциальной функции

$$w(\Theta) = n_1 e^{-n_1\Theta}. \qquad (11)$$

Это не всегда согласуется с результатами экспериментальных исследований распределения интервалов между последовательными ЧР. Отклонения от функции (11) особенно заметны при малых значениях Θ, поэтому для вычисления спектральной плотности ЧР-шума целесообразно использовать теорию импульсных процессов с независимыми интервалами. Будем считать, что на условную вероятность появления $j$-го ЧР в интервале $(t, (t + dt))$ влияет $(j - 1)$-й частичный разряд. Допустим, эта вероятность зависит от времени прошедшего с момента возникновения $(j - 1)$-го частичного разряда, что не противоречит экспериментальным результатам. Длительности интервалов между ЧР предполагаются независимыми между собой.

Решение этой задачи для стационарной последовательности ЧР вида $a_jF_j(t - t_j)$ с некоторым распределением временных интервалов $w(\theta)$ приводится следующей формулой (кроме точки $\omega = 0$):

$$g(\omega) = 2\pi n_1 \left\{ \overline{a}_2 \left|\overline{S_j(\omega)}\right|^2 + \right.$$

$$\left. + 2a^{-2}\left|\overline{S_j(\omega)}\right|^2 \mathrm{Re}\left[\frac{\varphi(\omega)}{1-\varphi(\omega)}\right]\right\}, \qquad (12)$$

где $S_j(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F_j(t)e^{-i\omega t}dt$ — разложение Фурье импульса, имеющего форму $F_j(t)$; $\varphi(\omega) = \int_0^{\infty} w(\Theta)e^{i\omega\Theta}d\Theta$ — характеристическая функция распределения интервалов.

Для экспериментальной проверки формулы (12) необходимо задать распределение интервалов $w(\Theta)$. Экспериментально в работе [6] получена эмпирическая формула для плотности вероятности распределения интервалов времени θ, разделяющих два следующих друг за другом ЧР

$$w(\Theta) = 4n_1^2\Theta e^{-2n_1\Theta}. \qquad (13)$$

Формулу (13) можно использовать для вычисления спектральной плотности электрического шума. При её подстановке в выражение (12) получим

$$g(\omega) = \frac{n_1 a^2}{2\pi(\lambda^2 + \omega^2)}\left[1 - \frac{1}{2 + \frac{1}{8}\left(\frac{\omega}{n_1}\right)^2}\right]. \qquad (14)$$

По сравнению с (8) формула (14) правильнее описывает моделируемую зависимость, так как содержит поправочный множитель, обусловливающий некоторый спад спектральной плотности ЧР-шумов в области низких частот. Вместе с тем поправка, введённая в (14), не исчерпывает вопроса о поведении спектральной плотности в области низких частот. Распределение количества ЧР $N$ по кажущимся зарядам $q$ и фазе воздействующего напряжения неравномерно. Максимальное количество ЧР наблюдается вблизи амплитуд воздействующего напряжения (90 и 270 град.). Таким образом, рассматриваемый шумовой процесс нельзя считать стационарным, поскольку его статистические характеристики являются функциями времени. Однако при диагностике высоковольтного оборудования под рабочим напряжением процесс можно отнести к *периодически нестационарным*. Это подтверждается экспериментально. Например, измерения на установке, представленной на рис. 1, показали, что спектральная плотность частичных разрядов $g(\omega)$ равна нулю при $\omega = 0$. Вместе с тем, теоретически установлено [2], что выполнение условия $g(0) = 0$ обеспечивает стационарность (или периодическую нестационарность) процесса $S(t) = \int_0^t u(\xi)d(\xi)$ при стационарном (или периодически нестационарном) процессе $u(t)$.

Покажем, что предлагаемая модель адекватно отражает изложенные выше теоретические и экспериментальные результаты, т. е., что для этой модели выполняется условие $g(0) = 0$. Для этого выразим спектральную плотность $g(\omega)$ через спектр $S_T(\omega)$ реализации случайного сигнала $u(t)$ на выходе датчика ЧР:

$$g(\omega) = \lim_{T\to\infty}\frac{2\pi}{T}\left|\overline{S_T(\omega)}\right|^2 =$$

$$= \lim_{T\to\infty}\frac{1}{2\pi T}\overline{\left|\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t)e^{-i\omega t}dt\right|^2}. \qquad (15)$$

Для ω = 0 выражение (15) принимает вид

$$g(0) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2\pi T} \overline{\left| \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t)dt \right|^2} .$$

Интеграл в последнем выражении пропорционален изменению заряда за период приложенного напряжения. Эта величина не может превышать значение кажущегося заряда $Q_s$ при полном пробое изоляции. Следовательно, $g(0) = 0$, что подтверждает адекватность предлагаемой модели (14) и позволяет её использовать при анализе результатов диагностики высоковольтного оборудования по параметрам спектрального распределения электрических шумов ЧР.

***Библиографические ссылки***


1. **Положение** о технической политике ОАО "ФСК ЕЭС" (раздел 2.2.6 "Диагностика и мониторинг оборудования"): [принято Советом директоров ОАО "ФСК ЕЭС" 01.01.2011 г.] URL: http://docs.cntd.ru/document/1200092834 (дата обращения 05.12.2013 г.).
2. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2007. 551 с.
3. **Meijer S., Gulski E., Smit J.** Pattern Analysis of Partial Discharges // IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation. Vol. 15, No 6, December, 2008. P. 830—842.
4. **Morshuis P., Jeroense M.** Partial Charge Meusurements on Impregnated Paper // IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 13, No 3, May/June, 1997. P. 385—392.
5. **Campbell L.L.** Sampling theorem for the Fourier transform of a distribution with bounded support // SIA J. Appl. Math. 1968. Vol. 16. No 3. P. 154—162.
6. **Zondervan J., Gulski E., Smit J.** Fundamental Aspects of PD Pattern of On-line Measurements on Turbogenerators // IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation. Vol. 7, No 1, February, 2000. P. 59—67.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

**ПРИПУСКИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ**

**Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов**

2013 г. Объем 256 с. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-607-9 Цена 800 р.

Приведены нормативные материалы, необходимые технологу-машиностроителю для расчета и выбора припусков на механическую обработку, даны рекомендации по выбору вида заготовок, составлению маршрута обработки, нормы точности, а также операционные припуски на обработку различных поверхностей деталей.

Для инженеров-технологов заводов, проектно-конструкторских организаций, а также может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 531.781.084.2

**В.А. Васильев,** д-р техн. наук, проф.
(Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пензенский государственный университет", г. Пенза),
**А.В. Хошев** (ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений", г. Пенза)
opto@bk.ru

# МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ИЗ ДВУХ ИСТОЧНИКОВ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Представлены результаты применения метода магнетронного распыления для создания гетерогенных структур нано- и микроэлектромеханических систем (НиМЭМС) датчиков механических величин. Сформулированы основные требования, предъявляемые к слоям гетерогенной структуры НиМЭМС. Показаны преимущества метода магнетронного распыления по сравнению с методом термического испарения в вакууме. Обосновано использование метода магнетронного распыления из двух источников для управляемого синтеза тензорезистивных плёнок из тугоплавких материалов. Дано описание технологического процесса получения наноразмерных плёнок Ni—Ti, образования гетерогенных структур НиМЭМС. Определены условия получения плёнок Ni—Ti с высоким удельным электрическим поверхностным сопротивлением и низким значением температурного коэффициента сопротивления различного знака.*

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, наноразмерная плёнка, гетерогенная структура, нано- и микроэлектромеханическая система.

*The application results of the magnetron sputtering method for the heterogeneous structures creation of nano- and microelectromechanical sensors systems (n&MEMS) of mechanical values are introduced. The main requirements proposed to the heterogeneous structure layers of n&MEMS are stated. The advantages of the magnetron sputtering method in comparison with the method of thermal evaporation in vacuum are shown. Magnetron sputtering method utilization from two sources for the controlled synthesis of piezoresistive films from refractory materials is justified. The technological process description for nanodimensional Ni—Ti films production, the formation of heterogeneous structures n&MEMS is presented. The conditions of the Ni—Ti films production with high specific surface electrical resistance and low temperature coefficient of resistance with different sign are defined.*

**Key words:** magnetron sputtering, nanodimensional film, heterogeneous structure, nano- and micro-electromechanical systems.

Современные датчики механических величин (давления, силы, ускорения и др.) создаются на основе нано- и микроэлектромеханических систем (НиМЭМС), в которых методами нано- и микроэлектронной технологии образуют гетерогенные структуры из тонких плёнок материалов на упругом элементе [1, 2]. В гетерогенных структурах из диэлектрических и металлических плёнок формируют тензорезисторы и терморезисторы, которые вместе с упругим элементом (мембраной, стержнем, балкой и т. п.) представляют собой чувствительный элемент НиМЭМС. Для получения тонких плёнок материалов таких гетерогенных структур наиболее освоенным методом является метод термического испарения в вакууме. Он заключается в переводе материала с помощью нагрева из твёрдой фазы в парогазовую и конденсации его атомов (молекул) на более холодной подложке в вакууме. С его помощью и при использовании метода фотолитографии представляется возможным формировать мостовые измерительные цепи в гетерогенных структурах НиМЭМС датчиков, как, например, в работе [3]. Гетерогенные структуры НиМЭМС датчиков давления могут содержать несколько слоёв плёнок материалов: переходный (может быть подслой хрома), диэлектрический (обычно $SiO—SiO_2$),

тензорезистивный (к примеру, Cr—Ni) проводниковый (например, из Au, Al).

К недостаткам метода термического испарения в вакууме можно отнести сложность получения плёнок заданного состава из разнородных материалов и обеспечения повторяемости параметров и характеристик плёнок, полученных в различных технологических циклах.

Альтернативным, перспективным и мало освоенным методом образования гетерогенных структур НиМЭМС является метод магнетронного распыления, появившийся позже, в середине семидесятых годов прошлого века [4]. Он позволяет получать проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические плёнки различных материалов толщиной от нескольких нанометров до десятков и сотен микрон. Метод обладает значительными преимуществами: имеет относительно высокую скорость нанесения плёнок, позволяет получать нано- и микроразмерные слои сложного состава даже при температурах подложки 20—50 °С, более высоком давлении (до $10^3$ Па), обеспечивает лучшую повторяемость параметров плёнок при определённых условиях (оптимальных режимах напыления). Плёнки, полученные магнетронным распылением, имеют стехиометрический состав, схожий с составом материала мишени, в отличие от плёнок, изготовленных с использованием метода термического испарения в вакууме. Адгезия таких плёнок лучше благодаря более высокой энергии осаждаемых частиц. Подложки не перегреваются и возможно получение плёнок на большей площади с малой степенью загрязнения.

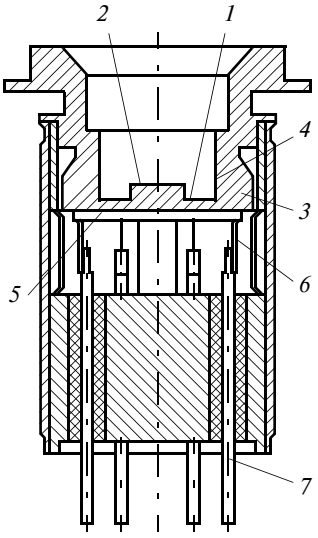



**Рис. 1. НиМЭМС тонкоплёночного тензорезисторного датчика давления:**
*1* — мембрана; *2* — жёсткий центр; *3* — основание; *4* — штуцер; *5* — гетерогенная структура; *6* — соединительные проводники; *7* — гермовывод

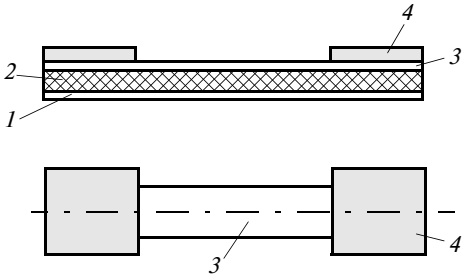



**Рис. 2. Тензорезистор, сформированный в гетерогенной структуре НиМЭМС:**
*1* — подслой диэлектрика; *2* — диэлектрический слой; *3* — тензорезистивный слой; *4* — проводниковый слой

С развитием систем управления технологическими режимами магнетронного распыления, их автоматизацией, магнетронное распыление всё шире применяется в промышленном производстве для нанесения металлических износостойких покрытий, получения проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических плёнок различного назначения.

Для образования гетерогенных структур НиМЭМС датчиков механических величин применение метода магнетронного распыления недостаточно исследовано, в связи с этим его применение ограничено. Дело в том, что к тонким плёнкам (подслою диэлектрика, диэлектрическому, тензорезистивному и проводниковому слоям) гетерогенных структур НиМЭМС датчиков предъявляются особые требования. Типичная НиМЭМС тонкоплёночного тензорезисторного датчика давления представлена на рис. 1. На плоской поверхности мембраны *1* образована гетерогенная структура *5* из тонких плёнок материалов, в которой сформирована мостовая измерительная цепь из тензорезисторов. Для подвода напряжения питания и снятия выходного сигнала служат соединительные проводники *6* и гермовывод *7*.

Гетерогенная структура образуется на упругом элементе (обычно из стали типа 36НХТЮ) с высотой микронеровностей не более 50—100 нм (при высоте микронеровностей поверхности выше 100 нм становится невозможным получение устойчивых тонкоплёночных структур и новых качественных показателей, характерных для прецизионных датчиков такого типа). На рис. 2 показан тензорезистор, сформированный в гетерогенной структуре НиМЭМС. Назначение и требования, предъявляемые к слоям гетерогенной структуры, следующие.

Подслой диэлектрика *1* (первый слой на поверхности упругого элемента) служит демпфером между упругим элементом и диэлектриком для снятия температурных напряжений, возникающих в процессе напыления, должен обеспечивать хорошую адгезию диэлектрической плёнки с материалом упругого элемента. Эффективная толщина подслоя из хрома 150—300 нм.

Задачей диэлектрического слоя *2* (второй слой) является обеспечение электрической изоляции между тензорезисторами (терморезисторами) и упругим элементом в широком диапазоне температур. При этом к диэлектрику предъявляются жёсткие требования по пористости, высокому удельному сопротивлению и, поскольку он работает при воздействии значительных механических нагрузок, необходимы высокие прочностные характеристики. Таким требованиям удовлетворяет структура $SiO—SiO_2$ при толщинах ~350 нм.

Очень жёсткие требования предъявляются к преобразующему деформации в изменение сопротивления тензорезистивному слою *3* (третий слой): большое удельное сопротивление, низкое значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС), высокая температурная стабильность, максимальный коэффициент тензочувствительности, широкий рабочий диапазон температур (от криогенных до комнатных), высокие механические характеристики, хорошая адгезия с диэлектрическим слоем и материалом контактных групп и др. Толщина такого слоя может быть 40—100 нм.

К проводниковому слою *4* (четвёртый слой), из которого формируют контактную группу (проводники, контактные площадки, перемычки), предъявляются следующие требования: низкое удельное сопротивление, хорошая адгезия и низкое переходное сопротивление с материалом тензорезистивного слоя (тензорезистора), низкий уровень окисления при воздействии рабочих температур и во времени, хорошая свариваемость с выводными проводниками при минимальной толщине, широкий диапазон рабочих температур, малый уровень тепловой и электромиграции. В качестве проводникового слоя хорошо зарекомендовала себя структура V—Au, толщина которой должна быть ~100 нм для исключения отслоения от диэлектрика.

Замена термического вакуумного испарения на магнетронное распыление для образования гетерогенных структур требует исследований и определения оптимальных режимов процесса напыления тонких плёнок. Особенно важно обеспечить управляемый синтез тензорезистивных плёнок, к которым предъявляются столь жёсткие требования. Ведь от параметров и характеристик, сформированных в гетерогенной структуре тензорезисторов, в основном зависят выходные параметры и характеристики датчиков.

Научный и практический интерес представляет синтез наноразмерных резистивных (тензорезистивных) плёнок с различным ТКС и высоким удельным поверхностным сопротивлением. Перспективным является исследование возможностей получения наноразмерных резистивных плёнок с заданными параметрами методом магнетронного распыления с использованием двух источников (мишеней). При использовании двух мишеней магнетронных распылителей имеется возможность изменять соотношение скоростей распыления материалов мишеней не только за счёт их размеров, но и путём изменения токов магнетронного разряда мишеней. Благодаря этому можно оптимизировать скорость распыления, оперативно и целенаправленно изменять состав и свойства тонких резистивных плёнок в процессе их напыления, добиться высокой производительности и однородности получаемых плёнок. Имеются предпосылки управляемого синтеза наноразмерных тензорезистивных плёнок из тугоплавких материалов (Mo, Re, Ti, W) и соединений с ними.

В работе [5] для получения наноразмерных резистивных плёнок применялся метод магнетронного распыления из двух источников с использованием мишеней из никеля и хрома. Были получены плёнки толщиной от 10 до 70 нм, их ТКС в диапазоне температур от минус 70 до 100 °С имел значения от $10^{-4}$ до $10^{-5}$ °$C^{-1}$. Результаты исследований, проведённых в данной работе, подтверждают преимущества метода магнетронного распыления для получения тензорезистивных плёнок НиМЭМС и показывают возможность получения плёнок Ni—Cr с различным ТКС. Однако применение таких плёнок в датчиках механических величин ограничено температурным диапазоном работы от минус 196 до 150 °С. Для расширения температурного диапазона работы датчиков до 300 °С могут быть перспективными наноразмерные резистивные плёнки Ni—Ti, однако режимы их получения и характеристики недостаточно исследованы для формирования из них тензорезисторов. Вместе с тем, их изучение может привести к созданию новых датчиков механических величин и других электронных приборов с улучшенными техническими характеристиками.

Метод магнетронного распыления (ионное распыление материалов в плазме магнетронного разряда) основан на свойствах катодной области аномального тлеющего газового разряда, возбуждаемого в скрещенных электрическом и магнитном полях. Мишень (катод) распыляется при бомбардировке ионами рабочего газа, в качестве которого могут быть Ar, $O_2$, CO, $N_2$, $CH_4$, $SO_2$ и др. (при давлении 0,01—10 Па, магнитной индукции 0,03—1 Тл у поверхности катода, напряжениях источника питания 1000—1500 В и разряда 300—900 В).

На рис. 3 показан магнетронный распылитель. Основными элементами, позволяющими реализовать метод, являются катод (мишень *3*), анод (корпус камеры *10*), магнитная система и система охлаждения. Магнитная система располагается под катодом, состоит из центрального *8* и периферийных магнитов *7* (обычно постоянные магниты) и магнитопровода *2*, служит для локализации плазмы вблизи поверхности мишени. При работе на постоянном токе мишени должны быть проводящими и могут быть из непроводящих материалов при использовании высокочастотных источников питания (при применении ВЧ-магнетронов).

Скорость образования (роста) плёнки при магнетронном распылении зависит от мощности или силы тока разряда и от давления рабочего газа, а также от размера распыляемой мишени *3*. Для получения плёнок металлов и сплавов в качестве рабочего газа используют инертный газ (в основном, Ar). На характеристики тлеющего разряда оказывают влияние давление рабочего газа и магнитное поле. При понижении давления рабочего газа возникает необходимость повышения напряжения питания (напряжения разряда). У магнетронных систем существует определённый интервал значений давления рабочего газа, при котором параметры тлеющего разряда существенно не меняются (обычно от 0,1 до 1 Па). Понижение давления рабочего газа вызывает необходимость увеличения напряжённости магнитного поля (магнитной индукции).

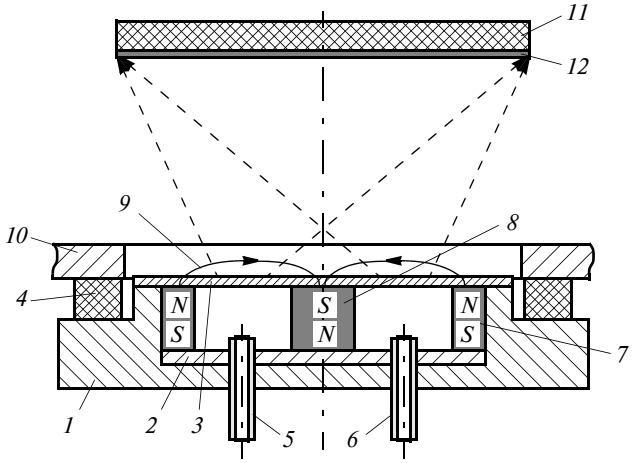



**Рис. 3. Магнетронный распылитель:**
*1* — корпус катодного узла; *2* — магнитопровод; *3* — мишень (катод); *4* — изолятор; *5*, *6* — трубки для подачи и отвода охлаждающей жидкости; *7* — периферийный магнит; *8* — центральный магнит; *9* — силовые линии магнитного поля; *10* — корпус камеры (анод); *11* — подложка; *12* — напыляемая плёнка

При одновременном действии электрического и магнитного полей становится иной траектория движения электрона, происходит его торможение при движении к аноду. Эмитированные катодом электроны локализуются непосредственно над поверхностью материала мишени, попадая в электромагнитную ловушку, в которой электроны двигаются по циклоидальной траектории вблизи поверхности катода под действием магнитного поля и в направлении анода под действием электрического поля. Такое поведение объясняется тем, что на заряд, движущийся в электромагнитном поле, действует сила Лоренца, которая зависит от направления электрического и магнитного полей. Часть этой силы, обусловленная действием магнитного поля, искривляет траекторию движения электрона, заставляя его двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной векторам скорости **V** и магнитной индукции **B**.

Ионы рабочего газа образуются в плазме тлеющего разряда между мишенью и анодом вследствие столкновения электронов с атомами газа и благодаря их циркуляции в созданной электромагнитной ловушке. Теряя в результате столкновений с атомами газа большую часть энергии, полученную от электрического поля, электроны попадают на анод.

Наличие замкнутого магнитного поля позволяет локализовать плазму тлеющего разряда у поверхности мишени, повысить вероятность столкновения электронов с атомами (молекулами) рабочего газа, увеличить количество таких столкновений, значительно повысить эффективность процесса ионизации и концентрацию положительных ионов у поверхности мишени, получить большую плотность ионного тока при меньших рабочих давлениях. Это обеспечивает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и увеличение скорости распыления.

Столкновение содержащихся в плазме частиц с высокой энергией приводит к эмиссии атомов

с поверхности материала мишени, распыляемые частицы осаждаются в виде плёнки *12* на подложке *11*, частично рассеиваются и оседают на стенках камеры. Из-за неоднородности электрических и магнитных полей интенсивность ионизации в различных зонах у поверхности катода неодинакова. Максимум интенсивности ионизации проявляется, когда линии индукции магнитного поля перпендикулярны вектору напряжённости электрического поля, а минимум — когда параллельны. В связи с этим, интенсивно распыляется поверхность мишени между входом и выходом силовых линий магнитного поля *9*.

Исследовался процесс магнетронного распыления из двух источников (магнетронных распылителей, изображённых на рис. 3) и получения наноразмерных резистивных плёнок Ni—Ti для их использования в качестве тензорезисторов. Задачей ставилось установление возможности получения наноразмерных резистивных плёнок Ni—Ti с отрицательным и положительным ТКС, определение режимов получения таких плёнок. Использовалась установка магнетронного распыления, схема которой показана на рис. 4. Она содержит магнетронный распылитель *1* мишени Ni, магнетронный распылитель *2* мишени Ti, нагреватель *3*, карусель *4*, расположенные на опорной плите *5* вакуумной камеры. На карусели *4* установлен держатель подложек *6* с термопарой *7* (для измерения температуры). Карусель *4* соединена с приводом вращения (на рисунке не показан). Материалом мишеней *1* и *2* был никель чистоты 99,99 % и титан чистоты 99,9 %. Подложки из ситалла устанавливались в держателе подложек *6* на карусели *4*.

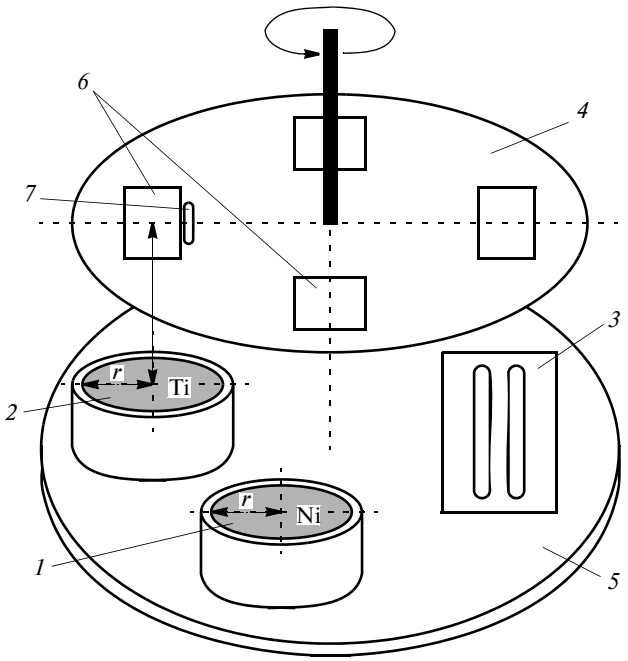



**Рис. 4. Установка магнетронного распыления:**
*1* — магнетронный распылитель мишени Ni; *2* — магнетронный распылитель мишени Ti; *3* — нагреватель; *4* — карусель; *5* — опорная плита вакуумной камеры; *6* — держатель подложек; *7* — термопара

Камера сначала вакуумировалась до давления остаточных газов не более 2 Па. Затем карусель *4* с подложками в держателе подложек *6* нагревалась. При этом производился напуск инертного газа аргона в камеру для создания рабочей среды. Процесс напыления осуществлялся после создания необходимого давления рабочей среды, задания плотностей токов в зонах распыления первой *1* и второй *2* мишеней (рис. 4) и приведения во вращение карусели 4.

Установлено, что резистивные плёнки Ni—Ti толщиной ~70 нм получаются при создании давления аргона ~0,05 Па, расположении карусели на расстоянии 0,05 м от мишеней из Ni и Ti, температуре подложек ~200 °С и времени напыления 10 мин. С изменением соотношения плотностей токов в зонах распыления мишеней из Ni и Ti меняется состав плёнок и их температурный коэффициент сопротивления.

Следует заметить, что не удавалось получить воспроизводимые параметры плёнок Ni—Ti при толщинах менее 20 нм. Это можно объяснить тем, что между зёрнами и кристаллитами применяемых материалов образуются тонкие слои оксидов и нитридов (из-за остаточных примесей в вакууме), которые вызывают неконтролируемые и хаотичные изменения параметров. В относительно толстой пленке (~70 нм) влияние оксидов и нитридов на электрическое сопротивление мало и обеспечивается воспроизводимость параметров (электрического сопротивления, ТКС).

Состав плёнок, электрическое сопротивление и ТКС изменяются из-за изменения скоростей распыления материалов мишеней. Известно, что скорость распыления материала мишени прямо пропорциональна плотности тока на мишени:

$$V = \frac{jk_{\text{P}}M_{\text{a}}}{eN_a\rho}, \qquad (1)$$

где $j$ — плотность магнетронного тока на мишени; $k_{\text{P}}$ — коэффициент распыления материала мишени, атом/ион; $M_{\text{a}}$ — атомная масса материала мишени, г/моль; $e$ — заряд электрона ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл); $N_a$ — число Авогадро ($6{,}023 \cdot 10^{23}$ атом/моль), $\rho$ — плотность материала мишени, г/см$^2$.

Коэффициент распыления $k_P$ характеризует эффективность распыления и определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности твёрдого тела одной падающей частицей: $k_P$ равно отношению числа удаленных атомов к числу падающих ионов. Для аморфных и поликристаллических материалов согласно теории Зигмунда коэффициент распыления определяется по формуле [6]:

$$k_P = \frac{3}{\pi^2}\alpha\frac{M_и M_а}{(M_и + M_а)^2}\frac{E_и}{2E_{суб}}, \qquad (2)$$

где $E_и$ — энергия падающих ионов, эВ; $E_{суб}$ — энергия сублимации материала мишени, эВ; $M_а$ — атомная масса материала мишени, г/моль; $M_и$ — атомная масса рабочего газа, г/моль; $\alpha$ — безразмерный параметр, зависящий от отношения $M_а/M_и$.

При магнетронном распылении из двух источников скорости распыления материалов мишеней можно устанавливать различные. Как видно из формулы (1), с изменением плотности магнетронного тока $j$ на мишени меняется скорость $V$ распыления её материала. Отношение скоростей распыления материалов мишеней (в данном случае из Ni и Ti):

$$\frac{V_{Ni}}{V_{Ti}} = \frac{j_{Ni}k_{PNi}M_{Ni}\rho_{Ni}}{j_{Ti}k_{PTi}M_{Ti}\rho_{Ti}}. \qquad (3)$$

Отношение $\frac{V_{Ni}}{V_{Ti}}$ в формуле (3) прямо пропорционально $\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}}$. Коэффициент связи между этими отношениями может быть установлен и зависит от материалов мишеней. В таблице сведены параметры никеля и титана из источника [7], а также коэффициенты распыления $k_P$ для Ni и Ti, рассчитанные по формуле (2) при значении энергии падающих ионов 450 эВ (такая энергия характерна для магнетронных распылительных систем) и коэффициенте $\alpha = 0{,}3$. Коэффициент $\alpha$ практически одинаков для Ni и Ti, его значение было определено из зависимости коэффициента $\alpha$ от отношения массы атома распыляемого материала $M_а$ к массе иона $M_и$, представленной в работе [6]. Подстановкой численных значений параметров в формулу (3) для мишеней из Ni и Ti получено следующее соотношение:

$$\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}} = 1{,}67\frac{V_{Ni}}{V_{Ti}}. \qquad (4)$$

Из формулы (4) следует, что для обеспечения равных скоростей распыления $V_{Ni} = V_{Ti}$ материалов мишеней отношение плотностей токов $\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}}$ магнетронного разряда на мишенях Ni и Ti должно быть равно 1,67. При таком отношении обеспечивается получение наноразмерных плёнок с одинаковым процентным содержанием атомов Ni и Ti. Увеличение отношения $\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}}$ приводит к увеличению процентного содержания Ni, а его уменьшение — к увеличению процентного содержания Ti.

При проведении экспериментальных исследований значение плотности тока $j_{Ti}$ на мишени из Ti выбиралось в интервале от $10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ А/см$^2$. При значениях плотностей токов на мишени из Ti, установленных из указанного интервала и соответствующих значениях плотностей токов на мишени из Ni, определённых как $j_{Ni} = 1{,}67j_{Ti}$, образцы плёнок Ni—Ti имели значения: удельное электрическое поверхностное сопротивление $\rho_S \sim 18$ Ом/квадрат, ТКС ~$10^{-5}$ °С$^{-1}$ (в диапазоне температур от минус 70 до 200 °С). Для сравнения плёнки чистого Ni имеют значения ТКС ~$10^{-3}$ °С$^{-1}$, удельного электрического поверхностного сопротивления ~2,5 Ом/квадрат.

Увеличение процентного содержания Ti и уменьшение Ni приводит к смене знака ТКС на отрицательный. Установлено, что при отношении $\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}} = 0{,}3$ значение ТКС становится минус $10^{-5}$ °С$^{-1}$ (в диапазоне температур от минус 70 до 200 °С), а удельное электрическое поверхностное сопротивление $\rho_S \sim 30$ Ом/квадрат.

**Параметры никеля и титана**

| Материал | Атомный номер $Z$ | Атомная масса $M$, г/моль | Энергия сублимации $E_{суб}$, эВ | Плотность $\rho$, г/см$^2$ | Коэффициент распыления, $k_P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Никель | 28 | 58,7 | 4,41 | 8,9 | 1,121 |
| Титан | 22 | 47,9 | 4,34 | 4,52 | 1,172 |

Смена знака ТКС наноразмерных плёнок Ni—Ti объясняется наличием дисперсности в структуре плёнок. Их электросопротивление можно рассматривать как суммарное сопротивление отдельных гранул (зёрен) и барьеров между ними (правило Матиссена), при котором характер общего сопротивления определяет величину ТКС. В плёнках, полученных при $\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}} = 1{,}67$, преобладает электрическое сопротивление самих зерен, и проводимость в большей мере носит металлический характер. При $\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}} = 0{,}3$ добавляется электрическая проводимость, носящая полупроводниковый характер (связанная с добавлением Ti, образованием оксидов и нитридов). Это приводит к изменению знака ТКС и возрастанию удельного электрического поверхностного сопротивления плёнок.

Из проведённых исследований следует, что при магнетронном распылении из двух источников могут быть получены резистивные плёнки Ni—Ti с относительно малым положительным и отрицательным ТКС, достаточно высоким удельным электрическим поверхностным сопротивлением. Такие характеристики плёнок удовлетворяют требованиям для изготовления тензорезистивных элементов НиМЭМС датчиков механических величин, а значение ТКС плёнок не более чем у широко используемых в настоящее время резистивных плёнок Ni—Cr (ТКС ~ $10^{-5}$ °$C^{-1}$), получаемых из сплава Х20Н75Ю методом термического испарения в вакууме.

Анализ метода магнетронного распыления из двух источников показал, что образование гетерогенных структур НиМЭМС датчиков механических величин в принципе может быть выполнено только с использованием метода магнетронного распыления (полная замена метода термического испарения в вакууме). Но для этого требуется проведение большого объёма исследований по определению оптимальных режимов магнетронного распыления с применением ВЧ-магнетронов для получения диэлектрического слоя гетерогенной структуры НиМЭМС. Первоначально целесообразна замена метода термического испарения в вакууме только на этапе напыления резистивного слоя. Хотя для этого также требуются исследования по установлению оптимальных режимов магнетронного распыления для новых материалов.

В результате проведённых исследований обоснована возможность применения метода магнетронного распыления из двух источников для получения наноразмерных резистивных плёнок Ni—Ti, определены условия их получения. Установлено, что при определённых отношениях плотностей токов на мишенях из Ni и Ti могут быть получены наноразмерные резистивные плёнки Ni—Ti с достаточно высоким удельным электрическим поверхностным сопротивлением и низким значением ТКС различного знака. Магнетронное распыление из двух источников может быть применено в процессе образования гетерогенных структур НиМЭМС и обеспечить получение тензорезистивных элементов, как с положительным, так и с отрицательным ТКС. Применение в качестве тензорезистивного слоя гетерогенных структур плёнок Ni—Ti может позволить улучшить технические характеристики датчиков механических величин, расширить их температурный диапазон работы, повысить точность.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Госзадание, код проекта 1267).*

***Библиографические ссылки***

1. **Белозубов Е.М., Белозубова Н.Е., Васильев В.А.** Микроэлектромеханические системы тонкоплёночных датчиков давления для высоких температур и виброускорений // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 10. С. 27—30.

2. **Белозубов Е.М., Васильев В.А.** Нано- и микроэлектромеханические системы тонкоплёночных датчиков давления. Принципы построения и перспективы исследований // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 9. С. 26.

3. **Патент** РФ № 2398195 Способ изготовления нано- и микроэлектромеханической системы датчика давления и датчик давления на его основе / Васильев В.А., Белозубов Е.М., Чернов П.С. // МПК G 01 L9/04, B82B 3/00. Бюл. № 24 от 27.08.2010.

4. **Wasa K., Kitabatake M., Adachi H.** Thin film materials technology. Sputtering of compound materials. — USA: William Andrew publishing, Springer, 2004. 531 p.

5. **Тимаков С.В.** Системы управления технологическими режимами магнетронного нанесения тензорезистивных плёнок / Автореферат диссертации на соискание уч. степени кандидата технических наук. Пенза. 2011. 22 с.

6. **Никоненко В.А.** Математическое моделирование технологических процессов / Под ред. Г.Р.Кузнецова. М.: МИСиС, 2001. 48 с.

7. **Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.** Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1980. 207 с.

УДК 681.513

**Кай Шэнь, А.В. Пролетарский,** д-р техн. наук, проф., **К.А. Неусыпин,** д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
neysipin@mail.ru

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ НАБЛЮДАЕМОСТИ ПОГРЕШНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Рассмотрены математические модели погрешностей автономных инерциальных навигационных систем и гиростабилизаторов. Представлен метод компенсации погрешностей автономных навигационных систем в выходном сигнале с помощью алгоритма оценивания. Используя численый критерий степени наблюдаемости, исследованы погрешности автономной инерциальной навигационной системы и даны рекомендации по реализации алгоритма коррекции.*

**Ключевые слова:** автономная инерциальная навигационная система, модель погрешностей, критерий степени наблюдаемости.

*Errors mathematical models for autonomous inertial navigation systems and gyrostabilizers are considered. The errors compensation method of autonomous navigation systems in an output signal by means of estimation algorithm is presented. Using numerical criterion of observability degree, errors of the autonomous inertial navigation system are investigated and recommendations about correction algorithm realization are given.*

**Key words:** autonomous inertial navigation system, errors model, observability degree criterion.

**Введение.** Рассмотрена модель погрешностей автономной инерциальной навигационной системы (ИНС). Погрешности автономной ИНС с течением времени могут достигать неприемлемых величин, поэтому их необходимо компенсировать [1—4]. Представлен способ коррекции автономной ИНС с использованием алгоритма оценивания [5—7]. Одной из качественных характеристик при оценивании переменных состояния является степень наблюдаемости [3—8].

Определение наблюдаемости исследуемых систем осуществляется критерием наблюдаемости и, с учётом принципа дуальности [3], критерием управляемости. Критерии наблюдаемости и управляемости позволяют наблюдать объект или управлять системой, т. е. выявлять структурные свойства объектов и систем, но не позволяют определять качественные характеристики. С помощью известных критериев степени наблюдаемости и управляемости можно определить степени наблюдаемости и управляемости компонент вектора состояния одного объекта исследования, но нельзя сравнить степени наблюдаемости различных векторов состояния разных объектов в различные моменты времени [3—5]. Численный критерий степени наблюдаемости компонент вектора состояния [6—8], определяющий степень наблюдаемости в виде скаляра, позволяет сравнивать степени наблюдаемости различных векторов состояния. Данный критерий удобен в применении и использован для исследования погрешностей автономной ИНС. Оценка степеней наблюдаемости переменных состояния проведена с использованием данных полунатурного моделирования.

**Погрешности навигационных систем.** Суммарная погрешность автономной ИНС для определения местоположения летательного аппарата (ЛА) нарастает с течением времени. В дискретной форме можно записать уравнения ошибок ИНС отдельно для каждого информационного канала.

Уравнение ошибок ИНС одного из горизонтальных информационных каналов имеет вид [1, 3]:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + W_{k-1}; \qquad (1)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1-\beta T \end{bmatrix}; W_{k-1} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ w_{k-1} \end{bmatrix},$$

где $\delta V_k$ — ошибка ИНС в определении скорости; $\varepsilon_k$ — скорость дрейфа ГСП; $\varphi_k$ — угол отклонения гиростабилизированной платформы (ГСП) относительно сопровождающего трёхгранника; $B$ — смещение нуля акселерометра; $W_{k-1}$ — вектор внешних возмущений; $g$ — ускорение силы тяжести; $R$ — радиус Земли; $\beta$ — средняя частота изменения случайного дрейфа; $T$ — шаг вычислений.

Модель (1) погрешностей ИНС в дискретной форме используется при разработке алгоритмов [7—10].

При функционировании автономной ИНС на длительных интервалах времени погрешности могут достигать больших величин и их необходимо компенсировать с помощью внешних навигационных датчиков информации или с использованием внутренних связей ИНС.

**Метод формирования измерений для компенсации погрешностей автономной ИНС.** ИНС, состоящие из акселерометров, расположенных на ГСП, имеют погрешности, обусловленные, в основном, дрейфом гироприборов. Одной из причин появления дрейфа гироскопов являются перекрёстные угловые скорости, возникающие при совершении ЛА сложного движения.

Наиболее полная компенсация погрешностей системы возможна с помощью алгоритма линейной фильтрации с использованием внешнего источника информации. Однако ИНС, корректируемая от внешнего датчика информации, теряет такое своё ценное качество, как автономность.

Компенсация ошибок ИНС методами линейной фильтрации без использования внешних измерений известна только для движения несущего ИНС объекта с постоянной скоростью. При этом в качестве уравнений объекта в алгоритме фильтрации используются уравнения ошибок автономной ИНС, а сигналы с акселерометров при движении объекта с постоянной скоростью принимаются за измерения [1]. В практических приложениях объект совершает, как правило, сложное ускоренное движение, поэтому использовать этот подход для компенсации ошибок не представляется возможным. Повысить точность выходной информации ИНС, используя только внутренние связи, можно не накладывая ограничений на режим полёта объекта.

Компенсация ошибок ИНС предполагает формирование сигналов коррекции, пропорциональных ошибкам системы в определении скорости, углам отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника и дрейфам ГСП. Данные ошибки автономной ИНС при отсутствии внешнего датчика информации не поддаются непосредственному измерению, поэтому для формирования компенсационного сигнала необходимо оценить ошибки системы с помощью алгоритма фильтрации. В качестве уравнений объекта в алгоритме фильтрации приняты уравнения ошибок ИНС, выраженные через углы отклонения ГСП относительно опорной системы координат, а в качестве измерений можно принять углы отклонения ГСП от плоскости горизонта и заданного направления в азимуте, сформированные на основе информации, снимаемой с датчиков углов прецессии гироскопов.

Движение гироскопов относительно ГСП описывается системой уравнений [2]:

$$\begin{aligned} J\ddot{\delta} + h\dot{\delta} + H\dot{\Phi}_1 &= H\dot{\Phi}_2\delta + H\dot{\Phi}_3\Phi_2 + M_1; \\ J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda} - H\dot{\Phi}_2 &= H\dot{\Phi}_1\lambda + H\dot{\Phi}_3\Phi_2 + M_2; \\ J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta} + H\dot{\Phi}_3 &= H\dot{\Phi}_2\vartheta - H\dot{\Phi}_1\Phi_2 + M_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\Phi_3$ — угловые координаты ориентации ГСП относительно выбранного сопровождающего трёхгранника; $\delta$, $\lambda$, $\vartheta$ — углы прецессии гироскопов; $J$ — момент инерции гироскопа относительно оси прецессии: $H$ — собственный кинетический момент гироскопа; $h$ — удельный момент сил скоростного трения вокруг оси прецессии гироскопа; $M_i$ ($i = 1, 2, 3$) — прочие малые возмущающие моменты, имеющие случайный характер (в дальнейшем не рассматриваются).

Рассмотрим уравнения движения гироскопов в первом приближении. Учитывая, что углы прецессии непосредственно измеряются датчиками углов гироскопов, то углы ориентации ГСП в первом приближении определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -\frac{1}{H}\int(J\ddot{\delta} + h\dot{\delta})dt; \\ \Phi_2 &= \frac{1}{H}\int(J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda})dt; \\ \Phi_3 &= -\frac{1}{H}\int(J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta})dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставим выражения первого приближения в исходную систему (2) и определим углы ориентации ГСП во втором приближении:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -\frac{J_\Gamma}{H}\dot{\delta} - \frac{h}{H}\delta + \frac{1}{H}\int\Big[(J_\Gamma\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda})\delta - \\ &- \frac{1}{H}(J_\Gamma\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta})(J_\Gamma\dot{\lambda} + h\lambda)\Big]dt; \\ \Phi_2 &= \frac{J}{H}\dot{\lambda} + \frac{h}{H}\lambda + \frac{1}{H}\int\Big[(J\ddot{\delta} + h\dot{\delta})\lambda + \\ &+ \frac{1}{H}(J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta})(J\dot{\delta} + h\delta)\Big]dt; \\ \Phi_3 &= -\frac{J}{H}\dot{\vartheta} - \frac{h}{H}\vartheta + \frac{1}{H}\int\Big[(J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda})\vartheta + \\ &+ \frac{1}{H}(J\ddot{\delta} + h\dot{\delta})(J\dot{\lambda} + h\lambda)\Big]dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, получены формализованные зависимости углов ориентации ГСП от углов прецессии гироскопов. Сформированные в соответствии с формулами (4) углы ориентации можно использовать в алгоритме оценивания в качестве измерения.

Следует заметить, что полученные углы $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\Phi_3$ несколько отличаются от истинных углов ориентации ГСП. Отличие обусловлено тем, что подынтегральные функции получены методом последовательного приближения. Углы ориентации ГСП в третьем приближении будут содержать в подынтегральных функциях члены третьего порядка малости, количественная роль которых столь незначительна, что их, как правило, не учитывают и ограничиваются вычислением углов ориентации ГСП только во втором приближении. Таким образом, используя информацию с датчиков углов гироскопов, можно непрерывно вычислять углы ориентации ГСП.

В качестве алгоритма оценивания необходимо использовать адаптивный алгоритм, способный функционировать в отсутствие априорной информации о статистических характеристиках входных и измерительных шумов [10]. Такая необходимость обусловлена тем, что в практических приложениях ковариационная матрица входных шумов, включающая смещение нуля, дрейф акселерометров и дрейф гироскопов, как правило, неизвестна. Априорная ковариационная матрица измерительного шума, включающая дисперсии ошибок формирования углов отклонения ГСП, обусловленных принятыми приближениями, также неизвестна.

Адаптивный фильтр по сформированным измерениям восстанавливает весь вектор состояния, включающий ошибки ИНС в определении скорости, углы отклонения и дрейфы ГСП. Оценка вектора состояния используется для компенсации погрешностей ИНС в выходной информации.

Метод компенсации ошибок ИНС позволяет в достаточной степени компенсировать погрешности системы, не используя внешний источник информации, т. е. сохраняя автономность системы.

Наиболее полная компенсация ошибок ИНС проводится с использованием методов линейной фильтрации. Однако компенсацию погрешностей ИНС можно осуществить, используя только внутренние связи системы и модель ошибок ИНС. Формирование компенсационных сигналов по-прежнему предполагается проводить на основе информации с датчиков углов гироскопов.

При компенсации ошибок ИНС в выходной информации необходимо сформировать сигналы, пропорциональные углам отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника и ошибкам ИНС в определении скорости. Углы отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника определяются интегрированием выражений для его угловых скоростей, полученных в первом приближении.

Погрешности ИНС в определении скорости формируются в соответствии с уравнениями ошибок ИНС следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta V_x &= \int(-g\Phi_1 + f_y\Phi_3)dt; \\ \delta V_y &= \int(g\Phi_2 + f_x\Phi_3)dt, \end{aligned} \qquad (5)$$

где $f_x, f_y$ — проекции абсолютного ускорения ЛА на оси ГСП.

В уравнениях (5) углы отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника определяются выражениями (3) или (4), а проекции горизонтального абсолютного ускорения ЛА на оси ГСП измеряются непосредственно акселерометрами.

По сравнению с методом компенсации ошибок ИНС при использовании внешнего датчика этот метод отличается меньшей точностью. Относительно низкая точность компенсации обусловлена тем, что сформированные углы отклонения платформы не адекватны истинным углам её отклонения относительно сопровождающего трёхгранника. К преимуществам предложенного метода формирования компенсационного сигнала следует отнести значительно меньший объём машинной памяти, необходимый для реализации компенсационных сигналов.

Применение данного метода компенсации ошибок ИНС позволяет значительно повысить точность выходной информации о навигационных параметрах ЛА.

**Критерии степени наблюдаемости.** В практических приложениях необходимо иметь возможность эффективного наблюдения каждой конкретной компонентой вектора состояния. Для этого введено понятие меры или степени наблюдаемости каждой конкретной переменной состояния [3—5, 7]. Свойство дуальности позволяет расширить методологический аппарат, а для определения наблюдаемости использовать сопряжённую систему и критерии управляемости.

Критерий [3] позволяет определить, какие компоненты вектора состояния управляемы и выделить компоненты, которыми можно управлять

наилучшим образом. Исключив из вектора состояния неуправляемые компоненты, можно достичь полной управляемости исследуемой системы. Уравнение исследуемого объекта и сопряжённое уравнение имеют вид [2]:

$$\begin{aligned} &\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t);\ z(t) = Hx(t); \\ &\dot{x}(t) = -A^T x_c(t) - H^T u_c(t);\ z_c(t) = B^T x_c(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $x(t)$ — вектор состояния; $A$ — матрица модели; $B$ — матрица управления; $u(t)$ — вектор управления; $z(t)$ — вектор непрерывных измерений; $x_c(t)$ — вектор состояния сопряжённой системы; $A$ — матрица модели сопряжённой системы; $B$ — матрица управления сопряжённой системы; $u_c(t)$ — вектор управления сопряжённой системы; $z_c(t)$ — вектор измерений сопряжённой системы.

Для определения наблюдаемости рассматривается сопряжённая система и к ней применяется критерий полной управляемости. Для того, чтобы воспользоваться этим критерием, необходимо перейти от матричного уравнения вида (6) к рассмотрению системы скалярных уравнений. Затем перевести скалярные уравнения из пространства оригиналов в пространство изображений по Лапласу и разрешить полученную систему уравнений относительно каждой переменной. Анализу подвергаются найденные по правилу Крамера определители Δ. Система вида (6) полностью наблюдаема, если найденные определители линейно независимы и ни один из них не равен нулю.

Исследуем критерий управляемости вида [3]:

$$C_1\Delta_1 + C_2\Delta_2 + \ldots + C_3\Delta_3 \not\equiv 0. \quad (7)$$

Данный критерий позволяет получить непосредственную связь между компонентами вектора состояния и компонентами вектора управления, и вынести суждение о степени по той или иной переменной состояния. В случае одинаковой структуры выражений Δ по коэффициентам этих выражений можно судить о степени управляемости.

Степень управляемости можно определить, исследовав систему канонического вида, т. е. систему уравнений, в которой отсутствует связь по переменным состояния.

Запишем первое уравнение (6) в канонической форме [4]:

$$\dot{x}_c^k = A^k x_c^k(t) + H^k u_c^k(t), \quad (8)$$

где $A^k = -V^{-1}A^T V$; $H^k = -V^{-1}H^T$; $V = [v_1 \ldots v_N]$, $V$ — матрица канонического преобразования; $v_i$ — собственные векторы исследуемой системы.

Система является полностью управляемой, если матрица $H^k$ канонической системы (8) не содержит строк, все элементы которых равны нулю. Следует отметить, что данный критерий можно применять лишь при отсутствии кратных собственных значений системы. Степень управляемости характеризуют модули элементов строк матрицы $H^k$. Представленный критерий позволяет проводить сравнительный анализ управляемости и определять лучше или хуже управляемы компоненты вектора состояния по сравнению друг с другом. Лучше управляемы те компоненты вектора состояния, у которых модули элементов строк матрицы больше модулей соответствующих элементов у других строк.

Эти критерии позволяют получить только относительную оценку наблюдаемости компонент конкретного вектора состояния исследуемой системы и не позволяют сравнивать наблюдаемость компонент векторов состояния различных систем. Поэтому все известные критерии неудобны для использования при сравнении качества наблюдения в общем случае.

Рассмотрим критерий степени наблюдаемости [7]. Непосредственно измеряемые компоненты вектора состояния имеют максимальную степень наблюдаемости. Качество наблюдения и достоверность информации измеряемой компоненты вектора состояния зависит лишь от погрешности измерения, т. е. от измерительного шума, величина которого определяется характеристиками внешнего источника информации, а также условиями функционирования, т. е. пассивными и активными помехами. Поэтому, полагая степень наблюдаемости измеряемой компоненты вектора состояния максимальной, имеем в виду то, что степень наблюдаемости равна 100 % с точностью до измерительного шума.

Пусть объект описывается уравнением вида (1). Часть вектора состояния измеряется:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (9)$$

где $z_k$—$m$ — вектор дискретных измерений; $H$ — $(m \times n)$ — матрица измерений; $v_k$—$m$ — вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием, причём $v$ и $w$ некоррелированы между собой ($M[v_j w_k^T] = 0$).

Не теряя общности постановки задачи, предположим, что измеряется одна компонента вектора состояния, т. е. $H = [1\ 0\ ...\ 0]$.

Разобьём каждый шаг измерений на $n$ подтактов и выразим эти измерения через вектор состояния на первом подтакте измерений [9]:

$$z^* = Sx_1 + v^*, \tag{10}$$

где $z^* = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ . \\ z_n \end{bmatrix}$; $S = \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ . \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix}$;

$$v^* = \begin{bmatrix} v_1 \\ Hw_1 + v_2 \\ ..... \\ H\Phi^{n-2}w_1 + \ldots + Hw_{n-1} + v_n \end{bmatrix}.$$

Выразим из уравнения объекта вектор состояния в первом подтакте измерения и введём обозначение

$$y = S^{-1}z^*. \tag{11}$$

Запишем уравнения (11) в скалярном виде:

$$y^i = a_1z_1 + a_2z_2 + ... + a_nz_n, \tag{12}$$

где $y^i$ — элемент вектора $y$; $a_i$ — $i$-я строка матрицы $S^{-1}$.

Дисперсия приведённого к $i$-й компоненте измерительного шума [9] определяется коэффициентами $a_1, a_2, ... a_n$, т. е.

$$r^{*i} = M[v^{*i}] = [a_1^2 + a_2^2 + ... + a_n^2]r, \tag{13}$$

где $r = M[V^2]$ — дисперсия исходного измерительного шума $v$.

Критерий степени наблюдаемости запишется в виде:

$$\lambda' = \frac{M[(x^i)^2]r}{M[(y^i)^2]r^{*i}}, \tag{14}$$

где $M[(x^i)^2]$ — дисперсия произвольной $i$-й компоненты вектора состояния; $M[(y^i)^2]$ — дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния.

В критерии степени наблюдаемости (14) мерой наблюдаемости является скаляр. Эта особенность выгодно отличает данный критерий от известных, так как позволяет сравнивать степени наблюдаемости компонент различных векторов состояния.

Рассмотрим степень наблюдаемости ошибок ИНС. Кроме различия во временных интервалах, необходимых для удовлетворительного оценивания ошибок ИНС, различны и относительные погрешности оценивания по отношению к оцениваемому номиналу. В связи с этим встает вопрос о степени наблюдаемости различных ошибок ИНС. Уравнения ошибок ИНС имеют вид (1), а уравнение непосредственных измерений — (9). Для непосредственного измерения компонент вектора состояния уравнения имеют следующий вид:

$$z(\delta V) = z_k;$$
$$z(\varphi) = \frac{1}{gT}z_k - \frac{1}{gT}z_{k+1}; \tag{15}$$
$$z(\varepsilon) = -\frac{1}{gT^2}z_k - \frac{1}{R}z_k + \frac{2}{gT^2}z_{k+1} - \frac{1}{gT^2}z_{k+2}.$$

Определим дисперсию приведённого к углу отклонения гиростабилизированной платформы относительно сопровождающего трёхгранника измерительного шума:

$$r_2^* = \frac{2}{g^2T^2}r, \tag{16}$$

где $r$ — дисперсия ошибки в измерении скорости, которая подлежит непосредственному измерению с помощью внешней информации.

В соответствии с выражением (16) определим степень наблюдаемости угла отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника:

$$\lambda_2 = \frac{M[\varphi^2]gT^2}{M[\delta V^2]2}. \tag{17}$$

Степень наблюдаемости скорости дрейфа ГСП определяется по формуле

$$\lambda_3 = \frac{M[\varepsilon^2]}{M[\delta V^2]\left[\frac{5}{g^2T^4} + \left(\frac{1}{gT^2} + \frac{1}{R}\right)^2\right]}. \tag{18}$$

Подставим в (17) и (18) численные значения параметров, полученных в результате полунатурного эксперимента с системами И-21 и КомпаНав-2 (протокол испытаний № 1-10/13 от 30.10.2013). Ошибка ИНС в определении скорости равна 60 м/мин, угол отклонения платформы

относительного сопровождающего трёхгранника $2 \cdot 10^{-4}$ рад., скорость дрейфа $10^{-5}$ рад/мин, период дискретизации выбран равным 1 мин. В результате получим, что степень наблюдаемости угла отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника равна 0,01, а степень наблюдаемости скорости дрейфа ГСП 0,0001.

Полученные значения степеней наблюдаемости имеют чёткий физический смысл. Относительная погрешность оценивания наблюдаемой компоненты вектора состояния по отношению к оцениваемому номиналу в случае оценивания угла отклонения ГСП будет такая же, как и относительная погрешность оценивания непосредственно измеряемой компоненты через 100 мин, а в случае скорости дрейфа через 10 000 мин.

Рассмотрим автономную ИНС с коррекцией согласно выражений (4).

Информация об угле отклонения ГСП от плоскости горизонта $S^{-1}$ запишется в виде

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} \left[-\frac{R}{T}+\frac{R}{\beta T^2}+\frac{g}{\beta}\right] & \left[-\frac{R}{\beta T^2}(2-\beta T)\right] & -\frac{R}{\beta T^2}(2-\beta T) \\ \left[-\frac{g}{\beta R}-\frac{1}{\beta T^2}\right] & \frac{2}{\beta T^2} & -\frac{1}{\beta T^2} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Дисперсия шума, приведённого к погрешности ИНС в определении скорости, имеет вид:

$$r_1^*(\delta V) = \frac{1}{\beta^2 T^4}\{R^2[6-2T+ \\ +\beta(T^2-4T+\beta T^2)]+gT^2(gT^2+R-R\beta T)\}r. \quad (20)$$

Подставляя в выражение для дисперсии приведённого шума численные значения:

$$T = 2 \text{ мин}; \ \beta = 10^{-2} \text{ мин}^{-1}; \ R = 6\,370\,000 \text{ м}; \\ g = 35\,280 \text{ м/мин}^2; \ r = 10^{-14} \text{ рад}^2,$$

получим $r_1^*(\delta V) = 506$ м$^2$/мин$^2$.

Используем в качестве дополнительного источника информации допплеровский измеритель скорости и угла сноса (ДИСС) и примем дисперсию $r = 2500$ м$^2$/мин$^2$.

Следовательно, для приборов, имеющих подобные характеристики, при вычислении погрешностей ИНС в определении скорости целесообразно измерять углы отклонения ГСП от плоскости горизонта и по этим измерениям оценивать погрешности в определении скорости.

Используя данные лабораторного эксперимента через три часа функционирования ИНС, вычислим степени наблюдаемости угла отклонения ГСП и скорости дрейфа ГСП. Ошибка в определении скорости практически не изменилась, угол отклонения ГСП увеличился в два раза, а скорость дрейфа ГСП увеличилась в среднем в 1,5—2 раза (в зависимости от конкретной реализации). Таким образом, степень наблюдаемости угла отклонения ГСП равна 0,02. Увеличение степени наблюдаемости позволяет эффективнее оценивать угол отклонения ГСП.

Степень наблюдаемости скорости дрейфа ГСП равна 0,00015—0,0002, что также способствует повышению точности оценивания.

При совершении ЛА интенсивных маневров углы отклонения ГСП и скорость дрейфа ГСП возрастают, но резко увеличивается и ошибка в определении скорости, так как сформирована на основе информации об углах прецессии гироскопов. Поэтому априори оценить степени наблюдаемости ошибок ИНС интенсивно маневрирующего ЛА не представляется возможным. Исследование требует обработки большого количества данных лётных экспериментов.

**Заключение.** Исследованы степени наблюдаемости погрешностей автономной ИНС. В схеме коррекции использован метод формирования измерений для алгоритма оценивания, основанный на сигналах с датчиков углов прецессии. Анализ качественных характеристик погрешностей ИНС проведён с помощью численного критерия степени наблюдаемости компонент вектора состояния, определяющего степень наблюдаемости в виде скаляра и позволяющего сравнивать степени наблюдаемости переменных состояния в различные моменты времени при маневрах ЛА. Результаты анализа степеней наблюдаемости позволяют дать рекомендации по реализации алгоритмической коррекции автономной ИНС: с течением времени степени наблюдаемости погрешностей ИНС увеличиваются и коррекция с помощью алгоритма оценивания становится более эффективной. В условиях интенсивного маневрирования ЛА сделать однозначный вывод о степенях наблюдаемости погрешностей ИНС не представляется возможным, поэтому для оценки эффективности алгоритмической коррекции ИНС целесообразно провести расчёты с использованием данных большого количества лётных экспериментов.

***Библиографические ссылки***

1. **Кузовков Н.Т., Салычев О.С.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение. 1982. 215 с.
2. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Цибизова Т.Ю.** Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации. М.: Изд. МГОУ. 2006. 265 с.
3. **Кузовков Н.Т., Карабанов С.В., Салычев О.С.** Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение. 1978. 221 с.
4. **Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И.** Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: Изд. МГУ. 1982. 173 с.
5. **Парусников Н.А., Голован А.А., Бараева В.Г.** О стохастической мере оцениваемости // В сб. Коррекция в навигационных системах и системах ориентации искусственных спутников Земли. М.: Изд. Моск. ун-та. 1986. С. 4—9.
6. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Власов С.В.** Исследование навигационных систем летательных аппаратов: учебн. пособие. М.: ИИУ МГОУ. 2013. 178 с.
7. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд. МГОУ. 2009. 500 с.
8. **Fang Ke, A. Proletarsky, K. Neusipin.** Selection of Measured Signals in the Navigation Measuring Complex. Journal of Measurement Science and Instrumentation. December. 2011.04. V. 02. P. 346—348.
9. **Салычев О.С.** Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение. 1987. 216 с.
10. **Proletarsky A.V., Neusipin K.A.** Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft. Science & military. V. 5. 2010. P. 75—80.

УДК 621.3.078.3

**Д.В. Салеев**
(Воронежский институт высоких технологий)
SaleevD@gmail.com

# АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ПОДСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

*Описан алгоритм управления технологическим процессом производства интегральных схем на основе модели адаптивного управления с подстройкой параметров модели. Применение настоящего алгоритма позволит учесть влияние неконтролируемых параметров процесса и улучшить качество производимых интегральных схем.*

**Ключевые слова:** интегральные схемы, алгоритм, адаптивное управление, технологический процесс.

*Management adaptive algorithm of the production technological process of integrated schemes based on the adaptive control model with adjustable parameters is described. Application of this algorithm allows to take into account the influence of the process uncontrollable parameters and improve the quality of the produced integrated schemes.*

**Key words:** integrated schemes, algorithm, adaptive management, technological process.

Технологический процесс (ТП) производства больших и сверхбольших интегральных схем (ИС) включает в себя множество технологических операций. Полный цикл производства включает в себя десятки последовательных технологических операций. Процесс состоит из различных по физическим принципам, технологическому оснащению этапов, при этом характер связей между отдельными операциями различен [1].

Большинство свойств, характеризующих качество изделий, формируются в ходе ТП. Поэтому качество ТП определяет во многом качество изделия, в связи с чем, нахождение наиболее оптимальной организации процесса является одной из основных задач для улучшения качества производимого изделия. Однако ТП производства ИС недостаточно хорошо определён: ввиду воздействия случайных и неконтролируемых параметров, параметры ТП изменяются с течением времени.

Адаптивное управление качеством производства — это один из наиболее популярных методов, используемых для оптимизации ТП в подобных случаях [2]. Одно из основных направлений развития теории адаптивного управления техноло-

гическими процессами в настоящее время — это создание адаптивных систем управления с подстраиваемыми математическими моделями [3].

В данной работе синтезируется алгоритм адаптивного управления ТП ИС с подстройкой параметров математических моделей управляемых объектов — второго этапа оптимизации производства ИС (рис. 1) — для дальнейшей практической реализации в рамках блока автоматизированной системы управления.

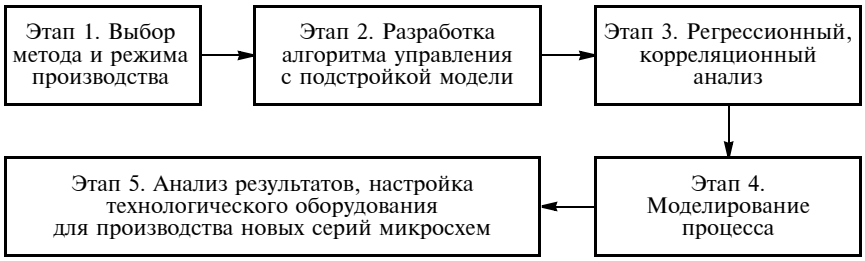



**Рис. 1. Оптимизация производства интегральных схем**

В общем виде можно записать модель ТП как:

$$Y_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}}, Z_{\text{упр}}), \quad (1)$$

где $Y_{\text{вых}}$ — множество (вектор) значений выходных переменных, $X_{\text{вх}}$ — вектор входных значений, $Z_{\text{упр}}$ — множество управляющих переменных (технологических воздействий, т. е. воздействий со стороны автоматизированной системы управления на процесс).

Обозначим вектор текущих значений выходных переменных как $Y_{\text{тек}}$, вектор текущих управляющих переменных как $Z_{\text{тек}}$, а множество (вектор) требуемых значений выходных переменных — как $Y_{\text{треб}}$.

Известно, что на качество ИС серьезно влияет качество исходных материалов (сырья) — $Q_{\text{исх}}$ — вектор входных переменных, учитывающий неидеальность параметров исходных материалов (или результатов предшествующих операций).

Тогда математическую модель процесса (1) можно записать в виде:

$$Y_{\text{вых}} = f(Y_{\text{тек}}, Z_{\text{тек}}, Y_{\text{треб}}, Z_{\text{упр}}, Q_{\text{исх}}). \quad (2)$$

В общем случае (2) представляет собой систему нелинейных уравнений. Поиск решения для данной системы может занять длительное время и зачастую невозможен [4]. В связи с чем, для проведения более быстрых расчётов при нахождении решения (2) предлагается приведение уравнений к линейному виду или виду с минимальной нелинейностью с использованием метода компромисса [2].

Так как управляющие и выходные переменные имеют ограниченный диапазон возможных значений, можно использовать полиномиальные аппроксимации, например линейные (для $n$ параметров ($n = 1, 2 \ldots$)):

$$Y_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^{n} k_i X_i + \sum_{i=1}^{n} k_i X_i Y_i + c_0,$$

где $k_i$, $c_0$ — некоторые коэффициенты.

Для поиска оптимального решения необходимо найти экстремум функции оптимизации $F$. Дополнительно необходимо выполнить проверку на попадание каждой переменной в область возможного регулирования каждого параметра.

Функция оптимизации [5] имеет вид:

$$F = F(Y_{\text{треб}}, Z_{\text{упр}}, Y_{\text{тек}}, X_{\text{тек}}). \quad (3)$$

В ходе ТП производства ИС регулирование процесса возможно только посредством управляющих переменных $Z_{\text{упр}}$. Необходимо найти такую целевую функцию, которая бы зависела только от $Z_{\text{упр}}$, текущих значений $X_{\text{тек}}$ с учётом требуемых выходных значений $Y_{\text{треб}}$.

Предположим, что воздействие со стороны системы управления на текущие значения выходных переменных описывается как:

$$Y_{\text{тек}} = \sum_{i=1}^{n} k_i \sin(Z_{\text{упр}_i}) + c_0. \quad (4)$$

При условии, что на управляющие переменные не накладывается никаких ограничений, используя метод наименьших квадратов, как один из наиболее точных [5] для поиска отклонений текущих значений параметров, запишем функцию оптимизации (4) как:

$$F = M(Y_{\text{треб}} - Y_{\text{тек}})^2, \quad (5)$$

где $M$ — вектор весовых коэффициентов выходных параметров.

Подставив (5) в (4), получим:

$$F(z_{\text{упр}}) = M\left(Y_{\text{треб}} - \sum_{i=1}^{n} k_i \sin(Z_{\text{упр}_i}) - c_0\right)^2. \quad (6)$$

Найдем экстремум этой функции, продифференцировав (6) по $Z_{\text{упр}}$ и приравняем к нулю. Таким образом, получим систему уравнений для нахождения $Z_{\text{упр}}$.

В частности, для одномерного случая с учетом (6) получим:

$$\frac{F(X_{\text{тек}})}{\partial X_{\text{тек}}} = 2(k_1 Y_{\text{треб}} - c_0 k_1)(\cos Z_{\text{упр}}) - $$
$$- k_1^2 (\sin 2Z_{\text{упр}}) = 0; \qquad (7)$$
$$X_{\text{оптим}} = Z_{\text{упр}}.$$

Однако уравнения (9) для проведения отчетов в реальном технологическом процессе ИС должны учитывать, что коэффициенты $c_0$, $k_1$ заданы с некоторой погрешностью. Поэтому введем $a_{0\text{зад}}$, $a_{1\text{зад}}$ — заданные с некоторой погрешностью коэффициенты, тогда:

$$Y_{\text{вых}} = a_0 + a_1\left(\frac{Y_{\text{треб}} - a_{0\text{зад}}}{a_{1\text{зад}}}\right) - \frac{a_1 a_{0\text{зад}}}{a_{1\text{зад}}} =$$
$$= \frac{a_1}{a_{1\text{зад}}}\left(Y_{\text{треб}} + a_0\left(\frac{a_1}{a_{1\text{зад}}} - \frac{a_0}{a_{0\text{зад}}}\right)\right).$$

Если коэффициенты заданы точно ($a_{0\text{зад}} = a$ и $a_1 = a_{1\text{зад}}$), то $Y_{\text{вых}} = Y_{\text{треб}}$.

Теперь необходимо учесть неконтролируемые параметры, возникающие в ходе ТП и влияющие на него. В подобных случаях, как указано ранее, следует использовать адаптивный алгоритм.

Пусть имеется ТП длительностью по времени $T$. Разобьём временной диапазон на $m$ частей. Пусть в одномерном случае математическая модель технического объекта для двумерного случая описывается уравнением:

$$\begin{cases} Y_1 = a_{01} + a_{11}\sin x_1 + a_{12}x_2; \\ Y_2 = a_{02} + a_{21}x_1 + a_{22}x_2. \end{cases}$$

Обозначим требуемые значения выходных и управляющих переменных как $Y_{1\text{треб}}$, $Y_{2\text{треб}}$, $Z_{1\text{треб}}$, $Z_{2\text{треб}}$. Тогда целевую функцию согласно (5) запишем как:

$$F = \varphi_1(Y_{1\text{треб}} - Y_1)^2 + \varphi_2(Y_{2\text{треб}} - Y_2)^2 +$$
$$+ \varphi_3(Z_{1\text{треб}} - Z_1)^2 + \varphi_4(Z_{2\text{треб}} - Z_2)^2.$$

Теперь необходимо ввести проверку на тот случай, если математическая модель перестанет адекватно описывать процесс, для этого предлагается следующий алгоритм.

Для оценки правильности математической модели будем вычислять отклонение расчётного значения от фактического и сравнивать его с некоторым допустимым значением отклонения $\Delta$:

$$|F_{\text{фактич } i} - F_{\text{расч } i}| \leqslant \Delta.$$

Фактическое значение рассчитывается путём подстановки в целевую функцию вместо текущих значений $Y_{\text{тек}}$ величин, измеряемых на выходе технологического процесса. Расчётное значение находится подстановкой значений выходных переменных $Y_{1i}$ и $Y_{2i}$, рассчитанных по математической модели.

При этом если модуль разности не превышает некоторого допустимого значения, считается, что математическая модель адекватно описывает реальный ТП и может использоваться для управления процессом. В остальных случаях математическая модель требует уточнения.

Значения управляющих и выходных переменных для $i$-го момента обозначим через $X_{1i}$, $X_{2i}$, $Y_{1i}$, $Y_{2i}$.

Передача данных в систему управления начинается в момент времени $t = t_0 = 0$.

С момента начала ТП требуется некоторый промежуток времени (с момента $t = t_0$ до $t = t_i$, $i = 1, 2, ..., n$) для сбора сведений о текущем состояний системы: настройках оборудования, заданных алгоритмах производства ИС и пр. В момент времени $t = t_i$ начинается реализация адаптивного алгоритма управления. Момент времени $t = 0$ — момент первого измерения параметров ТП.

Включение автоматизированной системы управления (т. е. управление технологическим процессом) начинается с момента времени $t_i$, т. е. с момента включения технологического оборудования.

В процессе управления данные передаются, заносятся в систему управления и записываются в файлы истории технологического процесса через определённый промежуток времени. При оптимизации технологического процесса следует ограничить данные, передаваемые в систему управления, используемые в настоящий момент: нужно применять данные за последний промежуток времени — $\Delta t$, так как ранее записанные данные являются устаревшими.

Величина $\Delta t$ подбирается с учётом времени проведения каждой технологической операции.

Таким образом, АСУ ТП получает и передаёт данные, необходимые для оптимизации технологического процесса. В целом представленный выше алгоритм см. на рис. 2.

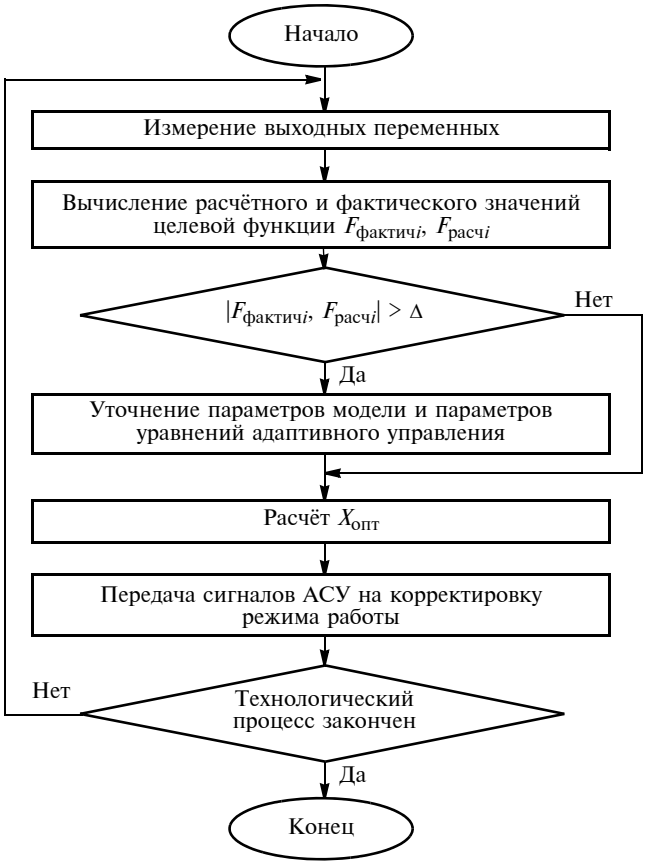



**Рис. 2. Алгоритм управления ТП производства ИС с подстройкой параметров модели**

Для определения влияния степени воздействия с помощью АСУ под фактическое состояние процесса для производства последующих серий изделий используется корреляционный, регрессионный анализ и данные, переданные в АСУ.

Использование адаптивного алгоритма управления процессом производства ИС обеспечивает оптимизацию уровня качества на стадии проектирования производства и проведения инженерно-технического анализа. В ходе ТП производства предложенный алгоритм позволяет реагировать на изменение неконтролируемых параметров и, если требуется, передачи сигналов в АСУ ТП для корректировки воздействия. Переданные в АСУ данные используются в следующих шагах оптимизации производства ИС для возможности моделирования реального ТП и настройки технологического оборудования до начала производства.

***Библиографические ссылки***

1. **Курносов А.И., Юдин В.В.** Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 256 с.

2. **Адаптивные** автоматические системы: сборник статей; [под ред. Г.А. Медведева]. — М.: Советское радио, 1972. 184 с.

3. **Норенков И.П.** Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1980. 311 с.

4. **Салеев Д.В.** Алгоритм управления качеством технологического процесса производства интегральных микросхем // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 33—37.

5. **Салеев Д.В.** Выделение главного параметра (показателя качества) для многокритериальной оптимизации технологического процесса // Техника и технология: новые перспективы развития: матер. IX Междунар. науч.-практич. конф., 24.05.13 г. М.: Спутник +, 2013. С. 36—40.

Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. **Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа**: справочник. Под ред. Г.А. Харламова. 2007. – 240 с., тв. пер., 60 × 88 1/16

ISBN 978-5-217-03376-8

**Цена 280 руб.**

Приведены сведения о современном состоянии и перспективах совершенствования нарезания цилиндрических зубчатых колес инструментами червячного типа. Изложены методы обработки. Рассмотрены методики расчета режущей части инструментов червячного типа и приведены новые и перспективные конструкции. Даны рекомендации по выбору режимов резания зубчатых колес с поясняющими примерами.

Для инженерно-технических работников и специалистов машиностроительных предприятий, научно-исследовательских институтов; может быть полезен преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел реализации по факсу: (495) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение". Справки по тел. (495) 269-52-98. http://www.mashin.ru

УДК 628.9

**С.А. Микаева,** д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный университет приборостроения и информатики),
**А.А. Ашрятов,** канд. техн. наук, доц., **А.А. Косицын**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск)
mikaeva@npo.lit.ru

# МЕТОД ПРЯМОГО ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ

*Рассмотрено применение новых перспективных методов и средств охлаждения полупроводниковых источников оптического излучения и приборов на их основе. В качестве наиболее эффективного метода описаны метод прямого жидкостного охлаждения чипа (кристалла светодиода) и концепция построения шинных светодиодных систем освещения на основе модулей с данным типом охлаждения.*

**Ключевые слова:** светодиод, светодиодные модули, система освещения, методы охлаждения, теплопроводные композиты.

*Application of new cooling perspective methods and means tor semiconductor sources of optical radiation and devices on their basis is considered. As the most efective method the chip direct liquid cooling method (a light-emitting diode crystal) and the creation concept of tire LED lighting systems on the basis of modules with this type of cooling are described.*

**Key words:** light-emitting diode, LED modules, lighting system, cooling methods, heat-conducting composites.

Соблюдение надлежащего теплового режима работы любых светодиодных источников света и приборов на их основе является крайне важной составляющей процесса эксплуатации, так как непосредственно от него зависит срок службы приборов, их светотехнические и колориметрические характеристики [1]. Таким образом, перед разработчиками встает вопрос создания такой конструкции прибора, которая в полной мере должна обеспечивать заданный тепловой режим работы при минимальных издержках на процесс охлаждения.

Традиционно для охлаждения полупроводниковых приборов используется активное и пассивное воздушное охлаждение, неотъемлемой частью которого является наличие радиатора, выполненного, как правило, из алюминия или меди. Несмотря на то, что данные металлы обладают хорошей теплопроводностью, их использование делает систему охлаждения относительно дорогостоящей и обладающей большими габаритами и массой. Так, по некоторым оценкам для отвода тепловой мощности в 1 Вт без перегрева активной области светодиода не более чем на 10 °С необходимо пассивное охлаждение в виде алюминиевой пластины площадью 100 см$^2$ [2]. За исключением этих недостатков, традиционные системы охлаждения имеют ещё и недостаток в виде относительно большого коэффициента теплового сопротивления между кристаллом светодиода и окружающей воздушной средой, находящегося на уровне 10 °С/Вт и более [3], а также низкий коэффициент передачи тепла от радиатора к воздушной среде. Такие значения теплового сопротивления и коэффициента передачи тепла не позволяют добиться максимального значения светового выхода при увеличении величины питающего тока свыше номинального и сохранении при этом минимальной площади радиаторной пластины. При увеличении коэффициента передачи тепла можно многократно увеличить световой выход за счёт работы светодиода при больших значениях плотности тока в приемлемом тепловом режиме. Подобный "разгон" светодиодного чипа позволит создавать приборы, имеющие максимальное значение светового потока с минимальной единицы площади кристалла, что востребовано в таких приложениях, как светодиодные проекционные лампы, высокоинтенсивные точечные излучатели для специального применения и т. п. Преградой для увеличения эффективности пассивных систем охлаждения является низкое значение теплопроводности окружающей среды (воздуха). Отчасти данная проблема снимается переходом на активное воздушное охлаждение с созданием завихрённых

потоков за счёт применения радиаторов сложной геометрии. Однако подобный выход не решает вопроса энергоэффективности и ресурсосбережения системы.

Наиболее перспективным методом охлаждения, лишённым подобного недостатка, является прямое жидкостное охлаждение чипа [4]. Теплопроводность многих жидкостей в разы выше теплопроводности воздуха, что позволяет существенно снизить суммарное тепловое сопротивление системы охлаждения чипа. Также кроме лучшего теплоотвода жидкость имеет свойство рассеивать световой поток, что может быть полезно при проектировании светодиодных световых приборов, лишённых прямой блескости, негативно сказывающейся на органе зрения.

Схема перемещения теплового потока при использовании данного метода приведена на рис. 1.

Охлаждение при данном методе осуществляется как через корпус светодиода, так и через верхнюю поверхность светодиодного чипа за счёт потока жидкости в камере между поверхностью чипа и куполообразной линзой. В таких системах охлаждения в качестве теплоносителя обычно используется деионизованная вода либо спиртосодержащие жидкости для работы в условиях пониженных температур [5]. Следует отметить, что при использовании жидкости, отличной от деионизованной воды, необходимо обращать внимание на устойчивость материалов прибора к коррозионным и иным воздействиям теплоносителя. На базе данного метода предлагается концепция построения шинных светодиодных систем освещения на основе модулей с прямым жидкостным охлаждением чипов. 3D изображение конструкции модуля в продольном разрезе представлено на рис. 2.

Конструкция модуля имеет пазы для их соединения между собой. Соединённые модули образуют герметичный канал для циркуляции теплопроводящей жидкости по замкнутому контуру, а также шину подвода электропитания. Жидкость является переносчиком тепла от корпуса модуля, кристалла и электродов светодиода. Таким образом, проточная система охлаждения модулей позволяет снизить габариты модулей, являющихся теплоотводами, а также использовать монтаж таких систем освещения в условиях низкой естественной конвекции воздуха (ниши натяжных и подвесных потолков и др.). Герметичность стыков модулей обеспечивается за счёт точности изготовления пазов модулей, которые являются разъёмным типом соединения. Тем самым повышается ремонтопригодность системы при отказе одного из модулей.

Для развёртывания систем освещения сложной геометрии целесообразно ввести три унифицированных типа модулей, представленных на рис. 3. Модули II и III типа принципиально не отличаются от модуля I типа, являющегося базовым (см. рис. 2), за исключением расположения соединительных пазов. Соединяя различные

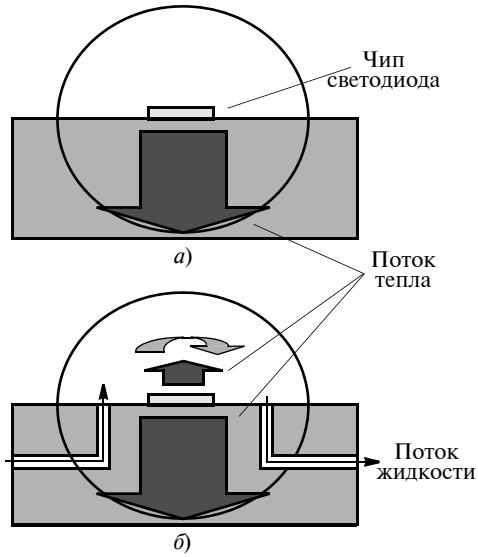



**Рис. 1. Схема перемещения теплового потока в светодиодах различной конструкции:**
*а* — в светодиоде обычной конструкции; *б* — в светодиоде с прямым жидкостным охлаждением чипа

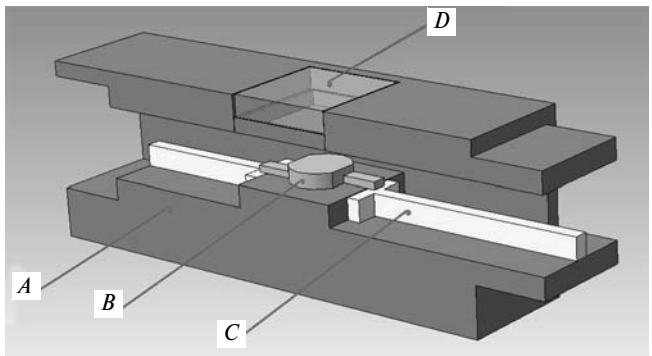



**Рис. 2. 3D изображение модуля I типа в продольном разрезе:**
*A* — корпус из теплопроводного электроизоляционного полимера; *B* — мощный светодиод; *C* — электропроводящая шина из коррозионно-стойкого металла; *D* — световое окно из матового полимерного стекла или полимерного стекла с нанесённым удалённым люминофором

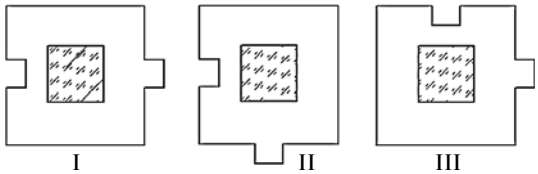



**Рис. 3. Типы унифицированных модулей**

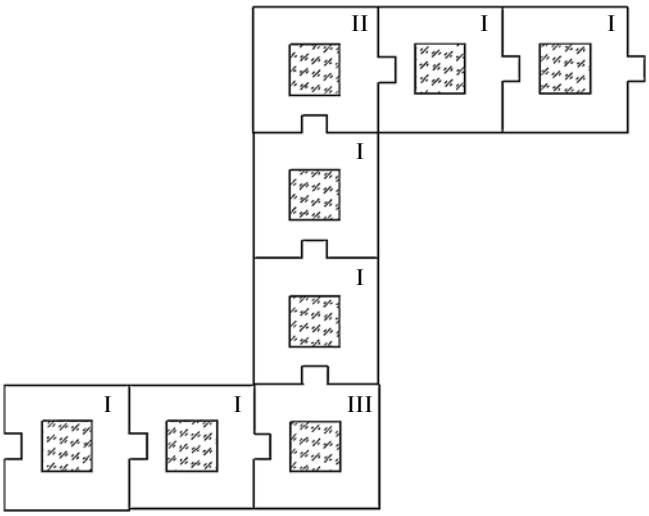



**Рис. 4. Пример геометрии системы освещения построенной из унифицированных модулей**

типы модулей между собой, можно получить системы освещения требуемой геометрии. Примером может служить система освещения, представленная на рис. 4. Для вариации местоположения модулей I—III типов в пространстве в систему освещения должны входить аналогичные "пустые" модули, предназначенные для передачи охлаждающей жидкости и питающего тока от одного модуля к другому, находящемуся на некотором удалении от первого.

Кроме унифицированных модулей в систему освещения также входят помпа для прокачки охлаждающей жидкости и драйвер питания, которые конструктивно целесообразно объединить в один блок.

Предложенная концепция построения систем освещения является уникальной, прямых аналогов на данный момент не существует. Эта идея призвана открыть новые направления для проектировщиков светодиодного освещения, так как подобный подход позволяет развёртывать высокоэффективные системы освещения по аналогии сборки конструктора "Lego".

***Библиографические ссылки***

1. **Гонин М.** Спасительная прохлада, или теплоотвод для мощных светодиодных матриц // Новости электроники + светотехника. 2013. №2. С. 17—23.

2. **Ефремов А.А., Бочкарёва Н.И.** Влияние джоулева разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40. № 5. С. 23—28.

3. **Лотар Ноэль.** Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 13—15.

4. **Луценко Е.** Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов и светодиодов с прямым жидкостным охлаждением чипа // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 3. С. 26—29.

5. **Куликова Т.А.** Теплопроводящие свойства чистых органических жидкостей. Нелокальный подход: автореф. дис. ... канд. техн. наук., 2000. 153 с.

УДК 622

**А.З. Бигалиева, М.М. Коккоз,** канд. педаг. наук, доц., **Р.Ж. Аймагамбетова, Ж. Сайлаукызы**
(Карагандинский государственный технический университет, Республика Казахстан)
alfija84@mail.ru

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

*Рассмотрена задача определения напряжённо-деформированного состояния выработок квадратного поперечного сечения с применением метода конечных элементов. Показана возможность применения элементов высокого порядка аппроксимации для выделения сингулярной составляющей напряжённо-деформированного состояния в окрестности углового концентратора.*

**Ключевые слова:** напряжённо-деформированное состояние, горный массив, выработки квадратного сечения, метод конечных элементов.

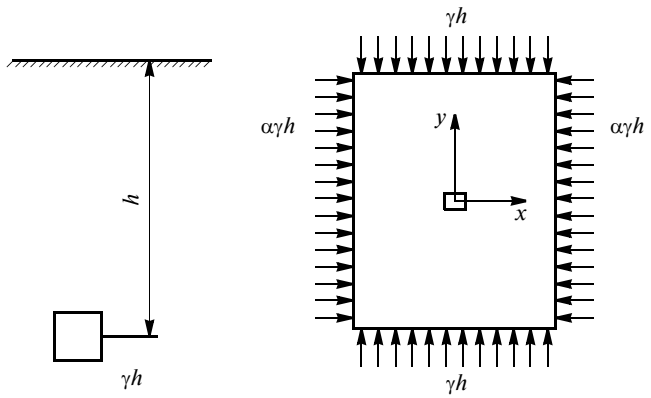
*The problem of the stress-deformed condition definition of the square cross section excavation with application of a final elements method is considered. Application possibility of elements of the high order approximation elements for discharge of a stress-deformed state singular component in the vicinity of the angular concentrator is shown.*

**Key words:** stress-deformed state, a massif, developments of square section, a method of final elements.

Исследование напряжённо-деформированного состояния вокруг подземных выработок и определение давления горных пород, действующего на крепь, является одной из основных задач горного дела. Сложность данной задачи объясняется разнообразием свойств горных пород, условиями проведения и залегания самих выработок, геометрией и пр.

Для линейной трещины в упругом поле горных пород количественной мерой является коэффициент интенсивности напряжений, характеризующий поле напряжений вблизи вершины трещины. Зная определение коэффициента интенсивности напряжений, можно сказать, является ли данное состояние тела критическим. Для углового выреза сложнее: коэффициент сингулярности зависит от угла раскрытия выреза и только в пределе совпадает с коэффициентом интенсивности напряжений, когда угловой вырез переходит в двусторонний разрез. В случае сложного напряжённого состояния для углового выреза поле напряжений имеет две сингулярные составляющие. Коэффициенты сингулярности не являются константами материала, так как зависят от угла раскрытия, т.е. не могут быть определены экспериментально.

**Постановка задачи.** В массиве горных пород со средним удельным весом $\gamma$ вертикальная составляющая горного давления на глубине $h$ равна $\gamma h$, а горизонтальная — $\alpha\gamma h$, где $\alpha$ — коэффициент бокового давления. Расчётная схема механической модели работы горного массива с горизонтальной квадратной выработкой выбирается согласно рекомендациям, изложенным в монографии [1]. Отверстие будет моделироваться при помощи задания усилия $\gamma h$, создающего эквивалентное состояние выработки (см. рисунок). Исследуя плоскую деформацию, данная схема позволяет получить удовлетворительные результаты для выработок, залегающих на достаточно большой глубине от поверхности (при $h/r \geqslant 50$, где $r$ — радиус выработки).




**Расчётная схема механической модели работы горного массива**

**Метод решения.** Для решения поставленной задачи используется метод конечных элементов. Рассмотрим шестиузловой треугольный элемент с прямолинейными границами второго порядка аппроксимации [2].

Перемещения любой точки внутри элемента задаются вектор-столбцом

$$f = N\delta^e = [N_1 N_2 N_3 N_4 N_5 N_6] \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где $N$ — компоненты, являющиеся функциями положения $\delta^e$ и представляющие собой перемещения узловых точек рассматриваемого элемента.

Если известны перемещения во всех точках элемента, то можно определить деформацию соотношением

$$\varepsilon = B\delta^e. \qquad (2)$$

Матрица $B$ может быть получена из выражения (1), если известны функции формы $N_i$ ($i = 1, ..., 6$).

В предположении упругого поведения соотношения между напряжениями и деформациями будут линейными:

$$\sigma = D\varepsilon, \qquad (3)$$

где $D$ — матрица упругости, содержащая характеристики материала.

Приравнивая работу внешних сил суммарной внутренней работе, получаемой интегрированием по объёму элемента, имеем:

$$d\delta^{eT} F^e = d\delta^{eT} (\int B^T \sigma dV - \int N^T p dV).$$

Эта зависимость является одной из основных характеристик любого элемента. Матрица жёсткости запишется в виде:

$$K^e = \int B^T D B dV.$$

Рассмотрим случай, когда на границе задана распределённая внешняя нагрузка $g$ на единицу площади. Тогда в узлах граничного элемента следует приложить дополнительную нагрузку.

Принцип виртуальной работы применён к отдельному элементу и было введено понятие эквивалентной узловой силы.

Можно считать, что выражение (1) относится ко всей конструкции, т. е. что $f = \overline{N}\delta$, где столбец $\delta$ содержит все узловые точки, а $\overline{N_i} = N_i^e$, если рассматриваемая точка принадлежит элементу $e$, т. е. точка $i$ сопряжена с этим элементом. Если точка $i$ не принадлежит рассматриваемому элементу, то $\overline{N_i} = 0$.

После учёта $df = \overline{N}\,d\delta$, $d\varepsilon = \overline{B}\,d\delta$, а также выражения (3) получим:

$$K\delta + F_p + F_b - R = 0. \qquad (4)$$

Произвольный элемент матрицы жёсткости имеет вид

$$K_{ij} = \int_V \overline{B}_i^T D\overline{B}_j\,dV, \qquad (5)$$

где интеграл берётся по всей области.

Решением уравнения (4) получаем смещение узловых точек элементов, а внутренние усилия в узлах элемента — умножением матрицы жёсткости (5) на вектор перемещений.

**Полученные результаты.** Численные методы проводились при следующих значениях материала горной породы: модуль Юнга $E = 5 \cdot 10^5$ Па, коэффициент Пуанссона $\upsilon = 0{,}3$, $\gamma = 2500$ кг/м$^3$, $\alpha = 0{,}25$. Размеры выработки $2 \times 2$ м, $h = 500$ м. Сходимость метода проверялась на последовательности сгущающихся сеток, содержащих 3200, 6400, 8122 элемента, использовались как квадратичные треугольные элементы, так и четырёхугольные элементы с кубической аппроксимацией. Результаты получены на сетке, содержавшей 8122 шестнадцатиузловых четырёхугольных элементов и 73 555 узлов.

В угловых точках имеет место концентрация напряжений. Разбиение на недостаточно мелкие конечные элементы приводит к значительному отклонению приближённого решения от точного на контуре выработки. Необходимо сгущать сетку в областях высоких градиентов напряжений. Степень приближённости решения методом конечных элементов оценивалась сопоставлением с точным решением для изотропной пластины с круговым отверстием [2].

Анализ результатов обнаруживает в окрестности точки $B$ область концентрации напряжений, представляющей собой опасную зону, где породы подвергаются сжатиям, которые могут превзойти предел прочности. По мере углубления в массив эта концентрация быстро снижается, и уже на расстояниях порядка двух диаметров выработки отклонения $\sigma_1$, $\sigma_2$, $\tau_{max}$ от начального напряжённого состояния не превышают 15 %. На кровле выработки появляются растягивающие напряжения, которые вызывают нарушение сплошности пород, так как плохо сопротивляются растяжению.

Увеличение кривизны контура выработки по сравнению с круговым контуром увеличивает концентрацию контурных напряжений. Изменение формы поперечного сечения выработки влияет только на распределение контурных напряжений. Наиболее прочной в заданных горно-геологических условиях будет выработка с контуром, обеспечивающим постоянство контурных напряжений [3].

Прочностные свойства неразрушенной породы описываются огибающей кругов Мора. Особенностью теории прочности Мора является то, что она описывает разрушение в результате, как сдвига, так и отрыва. Варьируя параметр $h$, можно получать распределение напряжений около выработки произвольной глубины заложения.

При построении дискретно-интегральных критериев используются понятия классической механики разрушения и физики твёрдого тела, связанные со структурой материала. Реальная трещина не является двусторонним разрезом, а может представлять собой угловой вырез, угол раскрытия которого определяется способом получения трещины.

***Библиографические ссылки***

1. **Баклашов И.В.** Геомеханика: учеб. для вузов. Т. 1. Основы геомеханики. М.: МГГУ, 2004. 105 с.

2. **Алексеев А.Д.** Физика угля и горных процессов. Киев: Наукова думка, 2010. 205 с.

3. **Корнев В.М.** Модификация критериев разрушения Нейбера — Новожилова для угловых вырезов // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 1. С. 153—159.

УДК 681.3.016

**И.И. Лавреш**, канд. техн. наук
(Сыктывкарский лесной институт — филиал ГОУ ВПО "Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С.М. Кирова"),
**Ю.В. Ланских**, канд. техн. наук
(ФГБОУ ВПО "Вятский государственный университет")
lyuv@inbox.ru

# АГЕНТНЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Обозначены теоретические основы повышения эффективности построения информационно-аналитических систем (теория управления, теория самоорганизации, методология построения устройств микропрограммного управления, методология построения многоагентных систем). Разработаны алгоритмы функционирования агента, ориентированного на максимальное использование ресурсов (индивидуальное соперничество за ресурсы), и функционирования агента, ориентированного на компромиссы для кооперативного решения задач.*

**Ключевые слова:** агенты, многоагентные системы, алгоритм, поток, информационно-аналитическая система.

*Theoretical bases of efficiency increase at information and analytical systems creation are designated (the theory of management, the theory of self-organization, construction methodology of microprogram management devices, construction methodology the multiagent systems). Functioning algorithms of the agent oriented on the maximum utilization of resources (individual rivalry for resources), and agent functioning oriented on compromises for the tasks cooperative solution are developed.*

**Key words:** agents, multiagent systems, algorithm, stream, information and analytical system.

**Введение.** Современные информационные системы характеризуются интеграцией функциональных модулей и подсистем различного назначения, автоматизацией регламентных операций обработки и передачи данных, поддержкой аналитических функций. Названные факторы подразумевают повышение требований к качеству диспетчеризации программного обеспечения в условиях ресурсных ограничений.

Таким образом, для современных информационных систем характерным является распределённый сбор и обработка информации, выполнение аналитических операций, унифицированных с точки зрения инвариантности источников данных, их структурных, количественных и прочих характеристик, а также необходимость эффективной управляемости программных модулей в автоматическом, регламентном, ручном режимах работы.

Проблема организации распределённого решения задач сбора и обработки информации стимулирует обращение к теории систем управления, синергетике, теории кооперативного решения задач в социологии организаций.

**Основная часть.** Организационные и социальные системы традиционно являются системами, позволяющими рассмотреть применение кибернетического подхода к проблематике кооперативного решения комплексных задач в условиях ресурсной ограниченности, нетождественности целей управляемых объектов и даже их частичного или полного антагонизма.

В общей теории систем [1] управляющая часть системы называется субъектом управления, а управляемая — объектом управления. Субъект управления оценивает результаты управления в форме выходных сигналов объекта управления, в частности подвергает их некоторой логической или вычислительной обработке, оценивает адекватность с точки зрения некоторой имеющейся модели и т. п. В зависимости от результатов оценивания субъект формирует управляющие сигналы. Состояние внешней среды является входным сигналом для совокупности объектов управления.

Нетождественность интересов управляемых объектов и ресурсная ограниченность являются факторами, препятствующими прямому применению традиционной теории управления.

Ниже рассматривалось построение информационно-аналитических систем, поддерживающих функции сбора, первичной обработки и предметно-ориентированного анализа данных с возможностями запуска обрабатывающих процедур по расписанию или вручную [2, 3]. Такая система строится как совокупность набора управляющих модулей (субъекта управления), набора модулей обработки данных и визуализации (объекта управления). Формализуется и минимизируется интерфейс взаимодействия между модулями системы. Правила планирования и запуска обработчиков, в частности автоматического формирования наборов исходных данных для них, описываются в качестве метазнаний системы.

Основная цель разработки — унификация построения и оптимизация внедрения обрабатывающих процедур, что позволяет формировать предметно-ориентированные информационно-аналитические системы с помощью разработки модулей обработки и визуализации данных на основе общего унифицированного подхода и внедрения их на универсальной программной платформе.

В основе предложенной методики — декомпозиция выполняемых системой функций и реализующих их модулей на функции хранения, обработки, передачи данных и управления [4], а также методология синтеза микропрограммных устройств управления процессорами [5].

Использование аналогии с микропрограммным устройством управления процессором позволяет рассматривать процесс планирования запуска обрабатывающих процедур как выборку их метаописаний и формирование структур, описывающих последовательности действий управляющего модуля (метакоманд) и исходные данные для запуска процедур.

При этом основными программными компонентами модуля управления системой являются:

контроллер памяти инструкций/метакоманд, выполняющий функции последовательного перебора зарегистрированных в системе обработчиков и выборку метаописаний формирования структур для их запуска;

контроллер памяти данных, выполняющий формирование набора исходных данных для запуска обрабатывающих процедур;

планировщик, формирующий последовательности действий модуля управления в соответствии с описаниями, формируемыми контроллером памяти данных.

Кроме того, в исполнительную часть модуля управления входят диспетчер обработок, выполняющий запуск обрабатывающих процедур по расписанию, и менеджер визуализации, выполняющий запуск процедур визуализации в соответствии с правилами их запуска и в зависимости от имеющихся данных.

Рассматривались практические аспекты организации запуска обработчиков, такие, например, как поддержка взаимных зависимостей обработчиков, позволяющих выстраивать последовательности их запуска. Однако очевидно, что расширение логики правил планирования и запуска обработчиков расширением их описаний небезгранично. Интеллектуализация обработчиков и необходимость их применения в более сложных предметных областях приводят к необходимости более сложного диагностирования их состояния, в частности возможности планирования и запуска, ожидаемого времени выполнения.

Теоретической основой интеллектуализации обеспечения работы с обработчиками может быть теория самоорганизации, в рамках которой объект управления приобретает черты "субъекта", т. е. способен самостоятельно оценивать эффективность своего поведения и частично его формировать.

Самоорганизация — это вид действий элементов искусственных систем, выражающийся в стихийном упорядочении действий, направленных на обеспечение собственных интересов, согласуемых в определённых пределах с интересами субъекта управления, зависящих от обстановки и образа действий субъекта управления [6].

Реализация элементов самоорганизации приводит к концепции построения систем, называемых многоагентными. В таких системах решение многоаспектной интеллектуальной задачи выполняется с использованием программных компонент, называемых агентами, каждый из которых является не пассивным исполнителем запросов, а активным мотивированным субъектом, способным расставлять приоритеты при планировании решения задач, руководствуясь собственными предыдущими обещаниями, намерениями и желаниями в отношении множества имеющихся задач, а также способностью к социальной мотивации и компромиссам. В соответствии с теорией многоагентных систем

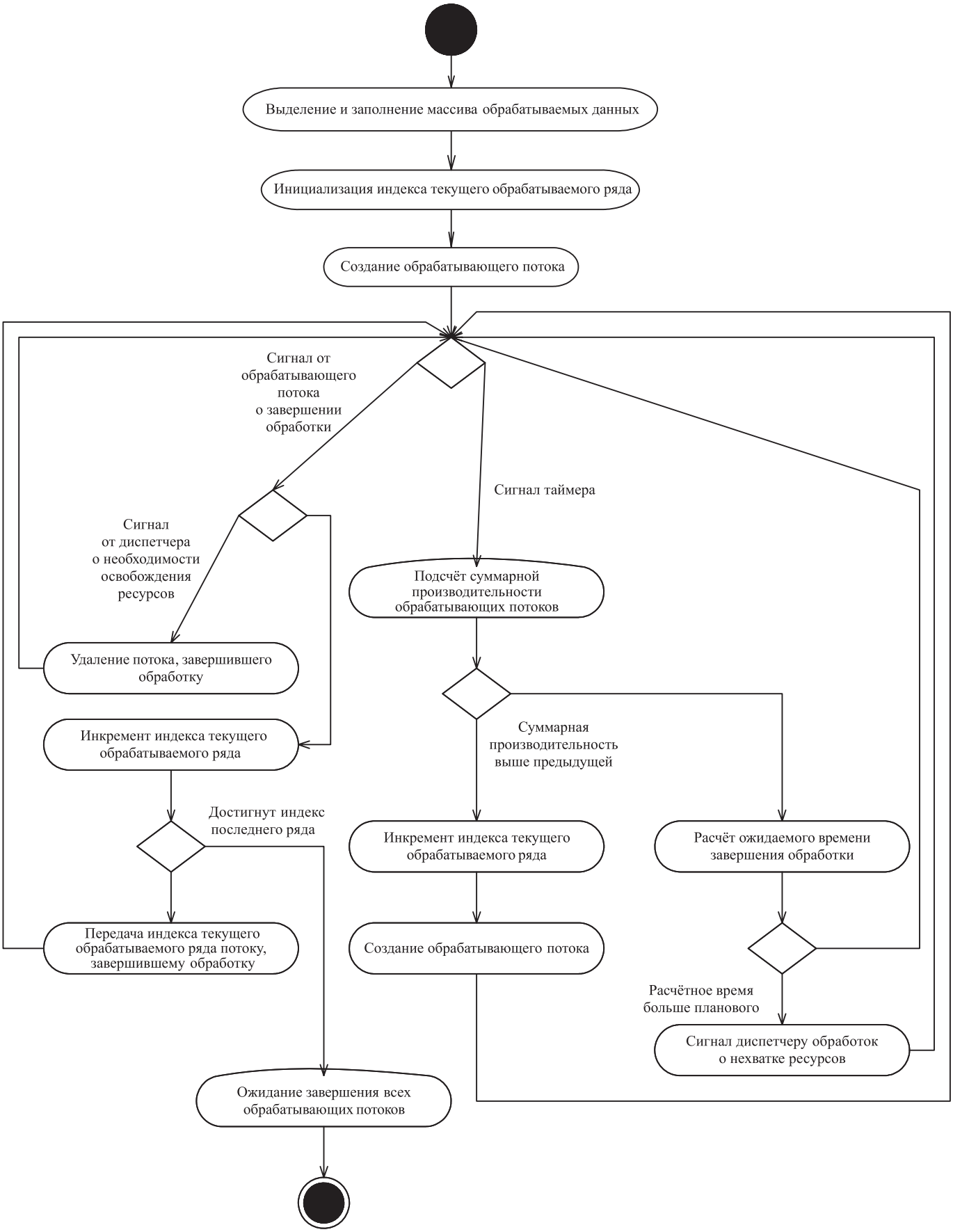



**Рис. 1. Диаграмма активности основного потока обработчика**

агент способен не только принять задачу или установить приоритет её выполнения, но и обоснованно отказаться от задачи [7, 8]. При этом агент может быть реализован как COM-сервис, Java-класс, CORBA-объект и т. п.

Уже рассматривалось построение многопотоковых обработчиков, позволяющих повысить суммарную производительность однотипной обработки крупных массивов данных на многоядерных архитектурах [9]. Рассмотренный подход подразумевал создание потоков до тех пор, пока создание очередного потока позволяет повысить суммарную производительность. При этом обработчик доходил до максимально возможного уровня использования ресурсов и позволял получить максимально возможную производительность. Разумеется, в рамках теории агентных систем такое поведение может рассматриваться только как проявление стратегии индивидуального соперничества и не соответствует представлениям о кооперативном поведении агентов. Таким образом, построенные указанным образом обработчики могут быть неспособны к коллективному решению задач, являющихся суперпозициями индивидуальных заданий, в условиях ограниченных ресурсов, в частности временных.

Для реализации кооперативного поведения рассмотренный алгоритм должен быть дополнен:

анализом соответствия актуального статуса решаемой задачи и обязательств агента;

выдачей сигнала диспетчеру обработок (называемому также "местом встречи агентов" — AMP — Agent Meeting Place) об опасности невыполнения обязательств;

обработкой сигнала от AMP о необходимости освобождения ресурсов в интересах других агентов.

Полученный в результате алгоритм представлен на рис. 1 диаграммой активности UML.

Основным подходом к организации кооперативного поведения в теории многоагентных систем является формирование единого плана действий с помощью последовательных многосторонних компромиссов, а затем следование этому плану под управлением управляющего агента.

Обращает на себя внимание то, что предлагаемый подход подразумевает только планирование запуска обработчиков и некоторые основные правила запуска (например, строго последовательный запуск некоторых обработчиков, что описывается на уровне метаописаний), а не построение общего плана распределения ресурсов. Предлагаемый подход кооперативно-конкурентного использования ресурсов следует оценивать как адаптивный, поскольку каждый обработчик в процессе своего функционирования оценивает возможность решения задач в указанные временные рамки и в зависимости от этого формирует запросы к диспетчеру обработок. Многоцелевое использование аппаратно-программной платформы информационной системы может стать причиной несостоятельности первоначальных планов, поэтому именно адаптивный подход позволит реализовать наиболее гибкую стратегию управления, позволяющую оперативно реагировать на актуальную ситуацию ресурсной обеспеченности и оптимизировать процесс получения решения задач.

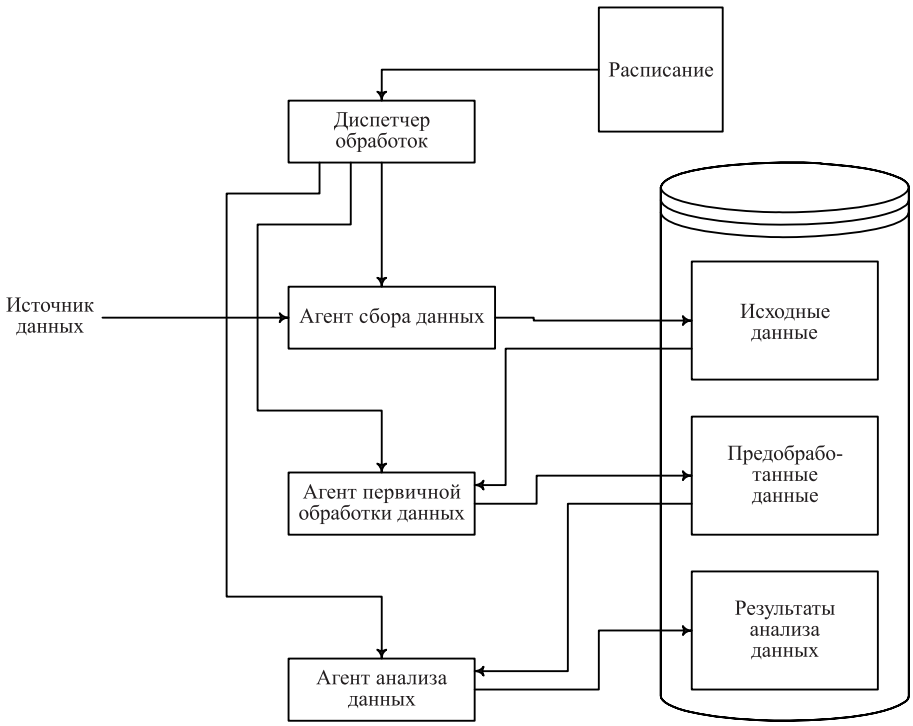



**Рис. 2. Пример структуры информационно-аналитической системы с многоэтапной обработкой данных**

В качестве иллюстрации результативности рассматриваемого подхода на рис. 2 приведён пример системы, где решение некоторой предметной задачи осуществляется в три этапа: занесение данных из ис-

точника в базу данных, первичная обработка данных с формированием исходных данных для решения задачи анализа данных, и, наконец, основная аналитическая задача. Можно обозначить классы задач, где данные каждой из упомянутых разновидностей представляют собой наборы однотипных данных, которые могут обрабатываться последовательно. Поэтому представляется неоптимальным строго последовательный запуск агентов сбора данных, первичной обработки и анализа данных. А при их параллельной работе необходимо обеспечивать наличие данных, являющихся исходными для каждого последующего этапа обработки. Это означает, что при отсутствии инструментов адаптивного управления скоростью управления агентов возможно возникновение явлений недообеспеченности того или иного агента исходными данными или ресурсами для обработки.

**Заключение.** Таким образом, сформулирован тезис о повышении эффективности решения аналитических, интеграционных и прочих задач, характерных для современных административных информационных систем, с использованием технологии построения агентных систем. Разработан алгоритм многопоточной обработки, на основе которого реализация агентов позволит получать системы кооперативного решения задач с эффектом динамической адаптации к ресурсной ситуации для максимального соответствия временным ограничениям.

***Библиографические ссылки***


1. **Садовский В.Н.** Основание общей теории систем. М.: Наука, 1974. 249 с.
2. **Ланских Ю.В.** Метапрограммная реализация модуля управления информационно-аналитической системой // Всероссийская научн.-техн. конф. "Наука—производство—технологии—экология". Киров: Изд-во ВятГУ, 2004. С. 43—45.
3. **Ланских Ю.В., Нечаев Д.С.** Организация управления в системах интеллектуального анализа данных // Вестник Вятского научн. центра Верхне-Волжского отделения АТН РФ. Серия: Проблемы обработки информации. Выпуск 1(5). 2004. Киров: Вятский научный центр, 2004. С. 144—149.
4. **Балашов Е.П., Пузанков Д.В.** Проектирование информационно-управляющих систем. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
5. **Балашов Е.П. и др.** Микро- и мини-ЭВМ: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. 376 с.
6. **Лавреш И.И.** Самоорганизация объектов управления и меры согласования интересов субъекта и объекта управления // Автоматизация и современные технологии. 2011 г. № 3. С. 36—41
7. **Тарасов В.Б.** Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 5—63.
8. **Shoham Yoav.** Agent-oriented programming // Artificial Intelligence. 1993. № 60(1). С. 51—92.
9. **Ланских Ю.В.** Принципы организации технологической платформы и процедур обработки данных в информационно-аналитической системе // Вестник ИТАРК. Сыктывкар: ИТ-Ассоциация Республики Коми, 2012. С. 24—28.

Кондаков А.И., Васильев А.С. **Выбор заготовок в машиностроении**: справочник. 2007. – 560 с., тв. пер., 60×88 1/16

ISBN 978-5-217-03382-9

**Цена 440 руб.**

Изложены методический подход и необходимое информационное обеспечение для обоснованного выбора исходных заготовок в условиях современного многономенклатурного машиностроительного производства. Приведены характеристики свойств основных конструкционных материалов и рекомендации по их выбору. Даны сведения об основных видах заготовок и способах их изготовления. Указаны основные критерии и правила выбора заготовок. Изложены различные методики обоснования решений, принимаемых при выборе заготовок. Рассмотрены проблемы автоматизации выбора заготовок на основе современных информационных технологий.

Для специалистов и технологов промышленных предприятий, работников научно-исследовательских учреждений, аспирантов и студентов втузов.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел реализации по факсу: (495) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение". Справки по тел. (495) 269-52-98. http://www.mashin.ru

# "АГРОПРОДМАШ-2014": У АГРОПРОМЫШЛЕННОГО РЫНКА РОССИИ БОЛЬШОЙ ПОТЕНЦИАЛ

В Центральном выставочном комплексе "Экспоцентр" на Красной Пресне с 6 по 14 октября проходила 19-я международная выставка "Агропродмаш-2014". Её организовал и провёл Экспоцентр при поддержке Министерства сельского хозяйства РФ, Правительства Москвы под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ.

Участниками экспозиции площадью более 22 тыс. м$^2$ стали 762 компаний (из них более 400 — российские) из 36 стран мира. Они продемонстрировали достижения и новинки для 30 отраслей пищевой промышленности. По оценкам многих специалистов, "Агропродмаш-2014" полностью оправдал свою многоотраслевую концепцию. 16 тематических салонов выставки охватили весь технологический процесс производства продуктов питания, включая сырьё и ингредиенты, основное технологическое оборудование, а также упаковочные, холодильные, логистические решения.

Смотр "Агропродмаш-2014 привлёк к себе особое внимание в связи с острой потребностью импортозамещения на российском продовольственном рынке. И как наглядно подтвердила экспозиция этого года, продовольственный и агропромышленный рынок России продолжает активно развиваться и остаётся в высшей степени привлекательным. Понимание того, что санкции — явление временное, и чтобы не потерять рынок, надо за него бороться, продемонстрировали своим активным участием в "Агропродмаш-2014" всемирно известные иностранные компании пищевой и перерабатывающей индустрии, такие как: MPS Red Meat (Нидерланды), SFK (Дания), Banss, EMF, Hartmann (Германия), Jarvis (США), AB Garos (Швеция), Marel Food Systems (Исландия), Lagarde (Франция), Jamesway Incubators (Канада), Nikko (Япония) и многие другие.

Большой интерес у специалистов вызвало оборудование для переработки мяса, рыбы и морепродуктов. Его привезли на выставку более 190 компаний — лидеров рынка из 21 страны. В рамках выставки прошло одно из ключевых мероприятий — Мясной конгресс, который ежегодно собирает представителей ведущих мясоперерабатывающих предприятий России для обмена опытом и обсуждения актуальных проблем отечественной мясной отрасли. В этом году организаторы предложили участникам конгресса обсудить возможности внедрения системы бережливого производства на предприятиях мясоперерабатывающей отрасли с целью повышения эффективности их работы и улучшения качества выпускаемой продукции.

Бережливое производство, в основе которого заложена производственная системы японской компании "Тойота", разработанная в 50-х гг. и получившая широкое распространение в мире в 80-х гг., является концепцией менеджмента, сфокусированной на оптимизации бизнес-процессов с максимальной ориентацией на рынок и с учётом мотивации каждого работника.

Лидеры отрасли активно внедряют новую систему управления производством, поскольку она даёт компании большое конкурентное преимущество. В Европе 80 % предприятий строят свою работу на принципах бережливого производства. В России это лишь 2 % компаний, в числе которых "Черкизовский МК", компания "Мираторг". Лидируют в этой области предприятия Татарстана.

Кондитерское оборудование представили 76 компаний. О положительной динамике развития этого раздела экспозиции свидетельствовал качественно изменившийся состав участников: если в прежние годы превалировали дистрибьюторы, то теперь всё больше производителей кондитерского и хлебопекарного оборудования предпочитают самостоятельно показывать свою продукцию. При этом большинство экспонентов демонстрируют оборудование в действии.

В Салоне "Ингредиенты, добавки, специи, оболочки" участвовали около 70 известных фирм и предприятий. В Салоне холодильного оборудования со своими новинками знакомили компании из России, Финляндии, Швеции, Германии, Италии. Дальнейшее развитие получили и другие тематические разделы, многие из которых пополнились новыми участниками.

Деловая программа выставки была сформирована в соответствии со сложившейся ситуацией в отечественном пищепроме, на внутрен-

нем и мировом продовольственных рынках. Состоялись такие крупные и важные отраслевые события, как Всероссийский форум "Кадры в пищевой промышленности России", IV Международный мясной конгресс, конференция "Птицепром 2.0/14. Индустрия птицеводства и птицепереработки", Bakery Case Forum 2014, конференция "Современные технологии и оборудование для переработки овощей и фруктов". Национальный союз мясопереработчиков совместно с Минсельхозом и Минпромторгом провели Всероссийское совещание руководителей мясоперерабатывающих предприятий "Пути преодоления кризисных явлений в отрасли". В дни работы выставки прошли также многочисленные семинары, мастер-классы, презентации, а также престижные профессиональные конкурсы.

Столь обширная программа и сама экспозиция позволили участникам "Агропродмаш-2014", специалистам отрасли, представителям власти и бизнеса получить наиболее полное представление о тенденциях, состоянии и перспективах российского АПК, мировой и отечественной пищевой и перерабатывающей индустрии, обсудить широкий круг важных и острых проблем. А коммерческая эффективность участия экспонентов в выставке вскоре проявится в новых клиентах, заказах, поставках и совместных проектах.


ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

*учебное пособие в 4 кн.* Под ред. **Д.В. Чернилевского**

**Кн. 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА. Н.В. Ладогубец, Э.В. Лузик**

Содержит основные положения, формулы и законы, используемые при изучении курса "Теоретическая механика", включая динамику материальной точки и динамику материальной системы и твёрдого тела. Даны алгоритмы решения задач, вопросы для самоконтроля и тестовые задания.

**Кн. 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. В.В. Астанин**

Изложены основные вопросы расчётов на прочность элементов машин и сооружений Приведены примеры решения типовых задач на растяжение и сжатие, сдвиг, кручение, изгиб, сложное сопротивление, повторно-переменные и динамические нагрузки.

**Кн. 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН. Я.Т. Киницкий**

Изложены основные понятия и определения курса, структура и классификация механизмов и машин, общие методы кинематического и динамического исследования механизмов, приведены некоторые сведения из теории регулирования движения машин и уравновешивания механизмов.

**Кн. 4. ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. Д.В. Чернилевский**

Изложены основные сведения о технологических функциях механизмов, их кинематических и силовых возможностях, достоинствах и недостатках, позволяющих технологу производственных процессов провести анализ и синтез при принятии решения в процессе разработки технического задания на совершенствование существующих конструкций машин или вновь проектируемых машинных комплексов.

Для студентов высших технических учебных заведений, изучающих курсы "Сопротивление материалов" и "Техническая и прикладная механика".

2012 г.
Формат 60x88 1/16
ISBN 978-5-94275-602-4
Цена за комплект из 4 книг 1000 р.

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

# ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

**Моделирование процессов управления в задаче рациональной замены оборудования.** *Вестник машиностроения*, 2014, № 7.

Рассмотрено моделирование задачи рациональной замены оборудования, расходы на эксплуатацию которого увеличиваются в результате его изнашивания. Дискретный характер управления функционированем современного оборудования обусловлен иерархической структурой и формированием управления в виде набора альтернативных вариантов.

**Статический и динамический расчёты новой затворной системы осевого уравновешивания ротора центробежного компрессора.** *Вестник машиностроения*, 2014, № 7.

Приведена методика статического и динамического расчётов системы автоматического уравновешивания осевых сил, действующих на ротор центробежного компрессора.

**Расчёт механизмов подъёма грузов плавучих кранов большой грузоподъёмности.** *Вестник машиностроения*, 2014, № 7.

Рассматривается расчёт механизмов подъёма плавучих кранов большой грузоподъёмности при ограниченном числе исходных данных по полученным ранее аналитическим зависимостям. Сравнение предложенной методики с уже используемыми расчётами применительно к конкретным кранам показало её адекватность и некоторые преимущества.

**Совершенствование технологии производства изделий из стеклопластиков**. *Вестник машиностроения*, 2014, № 7.

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электрофизической обработки полимерного связующего непосредственно в пресс-форме на механические характеристики стеклопластика. Приведены результаты структурных исследований.

**Наноструктурирование контактных поверхностей твёрдосплавного инструмента при резании.** *Вестник машиностроения*, 2014, № 7.

Исследован процесс наноструктурирования контактных поверхностей режущего инструмента при механической обработке. Определены принципы формирования износостойких наноструктурных покрытий для твёрдосплавного инструмента.

**Закономерности формирования приповерхностного слоя на металлокерамике, модифицированного при микролегировании низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком.** *Наноинженерия,* 2014, № 7.

Комплексная обработка твёрдого сплава, включающая в себя электронно-лучевое микролегирование и нанесение износостойкого покрытия, позволяет значительно повысить срок службы инструмента. Приведены результаты исследования микроструктуры модифицированного слоя.

**Современная солнечная энергетика на основе тонкоплёночных CIGS-элементов.** *Наноинженерия,* 2014, № 7.

В статье обсуждаются некоторые аспекты современного состояния рынка солнечной энергетики на основе тонких плёнок селенида меди—индия—галлия (CIGS), сложившегося после кризиса перепроизводства в мировой солнечной энергетике в 2011...2012 гг. Рассмотрено современное состояние и дан анализ тенденции развития среднесрочных и долгосрочных перспектив солнечной энергетики на основе CIGS.

**Монокристаллические наноструктуры металла, формирующиеся в ультрадисперсном беспримесном гидрозоле серебра.** *Наноинженерия,* 2014, № 7.

Экспериментально установлено образование монокристаллических структур металлов в их гидрозолях. Представлены фотографии структур, образующихся в беспримесном гидрозоле серебра, полученные с помощью электронного микроскопа. Описаны условия образования монокристаллов.

**Исследование геометрических размеров многостенных углеродных нанотрубок с использованием адсорбции азота.** *Наноинженерия,* 2014, № 7.

Исследованы сорбционные свойства многостенных углеродных нанотрубок (УНТ), полученных в различных технологических процессах. Получена зависимость удельной поверхности УНТ от их внешнего и внутреннего диаметров. Предложен метод определения диаметров УНТ, количества слоёв и доли открытых каналов УНТ по сорбции азота.

**Численная оптимизация загрязнений 3D-области выбросами группы источников.** *Наноинженерия,* 2014, № 7.

Построена модель с переменными параметрами групповых выбросов источников для 3D-облас-

ти. Получено численное решение задачи оптимизации загрязнения при неодинаковых нормативах загрязняющей нагрузки в подобластях. Результаты моделирования средствами MATLAB представлены в графике и доступны для анализа в любых сечениях 3D-области.

**Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов.** *Наукоёмкие технологии в машиностроении,* 2014, № 7.

Рассмотрены основные технологические особенности изготовления деталей из полимерных композиционных материалов. Даны рекомендации по проектированию технологических процессов лезвийной обработки полимерных композиционных материалов. Рассмотрено применение нейросетевых моделей для назначения режимов резания.

**Теория и практика разработки и применения высокоэффективных наукоёмких технологий производства газотурбинных двигателей.** *Наукоёмкие технологии в машиностроении,* 2014, № 7.

Приведены результаты научно-исследовательских работ, проведённых совместно с ОАО "Пермский моторный завод" и ОАО "Авиадвигатель", по исследованию, разработке и внедрению наукоёмких технологических процессов изготовления ответственных деталей ГТД в целях повышения производительности, качества и долговечности их работы.

**Инновационные технологии ультразвуковой обработки.** *Наукоёмкие технологии в машиностроении,* 2014, № 7.

Приведён краткий обзор применения ультразвуковых технологий в машиностроении. Дано описание ультразвукового технологического оборудования. Рассмотрены перспективные направления применения технологического ультразвука.

**Модульная технология и ее внедрение в механосборочное производство.** *Наукоёмкие технологии в машиностроении,* 2014, № 7.

Представлены решения типовых задач механосборочного производства на основе принципов модульной технологии.

**Повышение эффективности интегрированных технологических процессов на стадиях проектирования и реализации.** *Наукоёмкие технологии в машиностроении,* 2014, № 7.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности технологических процессов для станков с ЧПУ на основе аналитического прогноза возможных погрешностей обработки. Предложен алгоритм программной адаптации технологических решений, учитывающий фактические параметры жесткости технологической системы.

**Статистические методы оценки сложных технологических систем.** *Наукоёмкие технологии в машиностроении,* 2014, № 7.

Рассмотрены подходы к оценке состояния сложных технологических систем по результатам анализа вибросигнала об их колебаниях в целях выделения информации, необходимой для выработки обоснованных управляющих воздействий.

**Выбор направлений развития нормативно-правовой и нормативно-технической базы в сфере координатно-временного и навигационного обеспечения в Российской Федерации.** *Полёт,* 2014, № 7.

Приводятся результаты проведённого анализа возможных направлений развития нормативно-правовой и нормативно-технической базы в сфере координатно-временного и навигационного обеспечения в Российской Федерации. Рассматриваются три основных подхода к выбору направлений дальнейшего развития нормативной правовой базы в области КВНО.

**Сравнительная оценка альтернативных вариантов авиационных комплексов.** *Полёт,* 2014, № 7.

Обосновывается возможность проведения сравнительных оценок существующих и вновь разрабатываемых военно-транспортных самолётов методом синтеза альтернативных вариантов авиационных комплексов, созданных под заранее заданные тактико-технические требования, с акцентом на экономическую эффективность.

**Схемы спуска отработавших ступеней ракетносителей в требуемые районы с использованием автономной бортовой системы.** *Полёт,* 2014, № 7.

Представлены схемы спуска отделяющихся частей ступеней ракет космического назначения после выполнения своей миссии в заданные районы падения с помощью автономной бортовой системы, реализующей энергетические ресурсы, заключённые в невырабатываемых остатках топлива в баках.

**Методический подход к формированию математической модели процесса функционирования системы эксплуатации КА двойного использования.** *Полёт,* 2014, № 7.

Предложен методический подход к формированию математической модели системы эксплуатации космического аппарата (КА), позволяющий оценить влияние двойного использования космического комплекса. Рассмотрены основные тенденции совершенствования процесса лётной эксплуатации КА.

**Повышение надёжности зубчатых передач путём электроэрозионной обработки поверхности зубьев.** *Сборка в машинолстроении, приборостроении*, 2014, № 7.

Приведены результаты комплексных исследований влияния электроэрозионной обработки зубчатых колёс методом обката на зубохонинговальных станках на структуру, механические свойства, шероховатость и надёжность (износостойкость, долговечность и усталостную прочность), а также на механический КПД при различных крутящих моментах, температуру, уровень шума и звуковую мощность при различных частотах вращения. Моделирование надёжности зубчатых передач впервые произведено на основании структурно-энергетического подхода, который позволяет произвести оптимизацию технологического процесса электроэрозионной обработки деталей по новым объективным критериям.

**Сборочный автомат для установки упругих уплотнительных колец в наружные канавки цилиндрических деталей.** *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2014, № 7.

Описана работа сборочного автомата для установки упругих колец в наружные канавки цилиндрических деталей.

**Аналитические условия автоматической сборки.** *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2014, № 7.

Рассмотрены аналитические условия сборки для двух основных типов совмещения деталей: вал—отверстие и плоскость—плоскость. Системы автоматизации совмещения деталей выполняют с обратной связью, поэтому функционально они представляют собой системы автопоиска. Основной задачей системы автопоиска является уменьшение погрешности в процессе совмещения сопрягаемых деталей. Представлены условия свинчиваемости деталей при сборке резьбовых соединений. Показаны примеры работы систем автопоиска в сборочных комплексах.

**Системы обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением.** *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2014, № 7.

Описаны системы и группы систем для ультрафиолетового обеззараживания различных типов воды. Представлены основные параметры и технические характеристики этих систем

**Совершенствование расчётов размерной цепи при использовании метода групповой взаимозаменяемости.** *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2014, № 7.

Рассмотрено совершенствование метода расчёта размерной цепи при групповой взаимозаменяемости посредством снятия неопределённостей при назначении параметров групповых допусков. Определены рекуррентные формулы для расчёта верхних и нижних отклонений групповых допусков, на основе которых составляется программа ЭВМ.

**Изменение механических свойств изношенной поверхности, восстановленной пластическим деформированием.** *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 7.

Описывается новый способ восстановления изношенной поверхности пластическим деформированием, который реализует эффект повышенной пластичности материала, обеспечивающий качественный ремонт узлов трения, выполненных из материалов, имеющих различную пластичность. Представлены результаты комплексных исследований процесса деформирования в условиях наложенного гидростатического давления.

**Нанесение специальных покрытий как способ облегчения подготовки поверхностей деталей для их качественного соединения пайкой.** *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 7.

Исследуются закономерности пайки коррозионно-стойких сталей, имеющих плохую паяемость. Предлагается способ пайки со специально нанесёнными покрытиями. Этот способ значительно снижает затраты на подготовку деталей к пайке и облегчает сам процесс пайки.

**Технология нанесения твёрдого антифрикционного покрытия на дорожки качения упорно-радиальных подшипников.** *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 7.

Построена математическая модель и получены формулы для определения толщины покрытия в зависимости от влияющих в процессе обработки факторов. На основе выполненной работы были проведены стендовые испытания, подтверждающие адекватность математической модели.

**Повышение износостойкости деталей авиационной техники с гальваническими покрытиями.** *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 7.

Доказана эффективность использования дисперсно-упрочнённых композитных хромовых покрытий для повышения срока службы контактной пары применительно к паре трения сталь—бронза. Проведённые эксперименты показали уменьшение износа в зависимости от режима работы пары трения в 4...14 раз.

**Исследование микро/нанопрофиля цинкового покрытия при вибрационной механохимической обработке углеродистых сталей.** *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 7.

Представлены исследования структуры нанорельефа вибрационного механохимического цинкового покрытия.