УДК 621.317.18

В.А. Светличный, В.В. Тулупов

Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков

КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТИ ТОНКИХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрены вопросы, связанные с неразрушающим вихретоковым контролем неферромагнитных покрытий. Выявлены критерии наличия пористости структуры и разработан способ контроля пористости тонких металлических пленок.

Ключевые слова: *бесконтактность измерения, объект контроля, вихретоковый измерительный преобразователь, толщина объекта контроля, магнитный поток, электрическое поле, разность потенциалов, катушка индуктивности, цилиндрическая измерительная катушка, плоская измерительная катушка.*

Постановка проблемы

Система контроля качества продукции является одной из существеннейших частей любого производства. На каждом этапе развития общественного производства существовали специфические требования к качеству продукции. На ранних стадиях становления промышленности основными требованиями к качеству являлись точность и прочность. Масштабы производства позволяли проводить проверку каждого и отбраковку дефектных изделий. По мере развития промышленного производства продукция становилась все более сложной, число ее характеристик постоянно росло. Встал вопрос проверки не отдельных свойств изделий, а его функциональной способности в целом. На сегодняшний день сформировалась система контроля качества продукции, суть которой заключалась в обнаружении дефектной продукции и изъятии ее из производственного процесса. Контроль качества продукции состоит в проверке соответствия показателей её качества установленным требованиям. Одной из составляющих системы контроля качества является неразрушающий вихретоковый метод контроля.

Вихретоковый метод контроля основан на анализе изменения электромагнитного поля вихревых токов под действием тех или иных неоднородностей в объекте контроля (ОК). Так как вихревые токи могут возникать только в электропроводящих материалах, то объектами вихретокового контроля могут быть изделия, изготовленные из металлов, их сплавов, графита и других электропроводящих материалов. Одним из разновидностей вихретокового контроля является контроль тонких неферромагнитных металлических пленок широко применяемых при производстве интегральных микросхем; в авиационной и космической технике; в производстве оптических приборов, в микроволновой и другой технике.

Развитие электронной микроскопии позволило получить наглядное представление о процессе образования тонких пленок на начальной стадии конденсации. Установлено, что пленки малой толщины представляют собой островковый конденсат, состоящий из отдельных частиц [1]. В [2] показано, что при вихретоковом контроле неферромагнитных материалов такое несовершенство структуры пленок эквивалентно электрическим диполям.

Изложение основного материала

Нами разработан способ контроля несплошности ОК, заключающийся в том, что на высоких частотах вихретоковый измерительный преобразователь (ВИП), имеющий катушки индуктивности цилиндрической формы, реагирует на тонкие неферромагнитные, пленки, имеющие пористую, островковую структуру. Это отличие заключается в следующем: у настроенного на полный резонанс ВИП выходной сигнал U_2 увеличивается, если в измерительный зазор между катушками помещать тонкие пленки, толщиной <0,01мкм с несплошной структурой. Относительное повышение сигнала составило до 10%.

$$\delta_{отн} = \frac{U_2 - U_{20}}{U_{20}} = N_0 - 1. \qquad (1)$$

Увеличение выходного сигнала при контроле несплошности тонкой пленки ОК цилиндрическим экранным ВИП можно объяснить следующим образом. У цилиндрических катушек при питании их переменным током в рабочем зазоре между катушками, по отношению к ОК, существует нормальный магнитный поток $\overline{H}$, изображенный на рис. 1. Нормальный магнитный поток создает в рабочем зазоре тангенциальное электрическое поле $\overline{E}$. При нали-

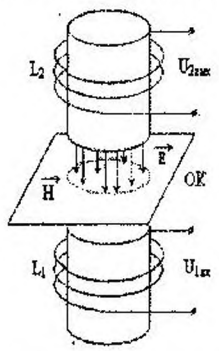

Рис. 1. Цилиндрический экранный ВИП

© В.А. Светличный, В.В. Тулупов

чии дефектов в структуре металлической пленки ОК, а именно, разрывов, между границами разрыва может возникнуть очень сильное электрическое поле. Электрическое поле обусловлено действием разности потенциалов φ_1 и φ_2 между границами разрыва

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_a^b \vec{E} d\vec{l}. \qquad (2)$$

При этом напряженность между границами разрыва будет очень большой, если расстояние между границами d будет малым (рис. 2).

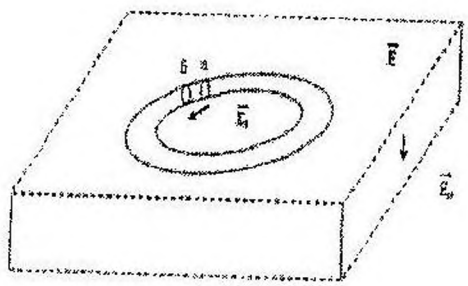

Рис. 2. Электрическое поле на границе а-б поры

$$\vec{E}_l \approx \frac{U}{d}. \qquad (3)$$

Это же поле, как известно, является одним из факторов, вызывающих электронную эмиссию, которая обеспечивает проводимость очень тонких пленок.

Поскольку толщина исследованных нами металлических пленок была очень малой и исчислялась сотыми долями мкм, электрическое поле в разрыве $\vec{E}_l$ имеет значительную нормальную составляющую E_n (рис. 3).

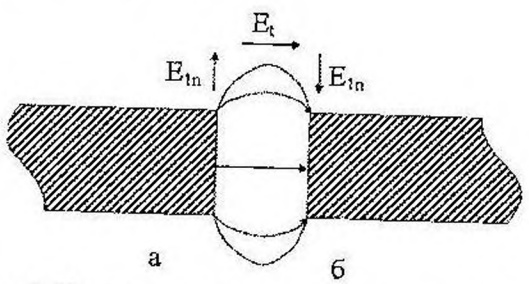

Рис. 3. Нормальная и тангенциальная составляющая электрического поля на границах разрыва

Плотность тока электрического смещения выражается законом

$$\frac{dD}{dt} = E_a \frac{dE}{dt}. \qquad (4)$$

Ток электрического смещения вызывает магнитное поле. Магнитные силовые линии этого поля перпендикулярны магнитному полю катушек. Это поле наводит электродвижущую силу в вертикальных составляющих обмотки измерительной катушки (рис. 4).

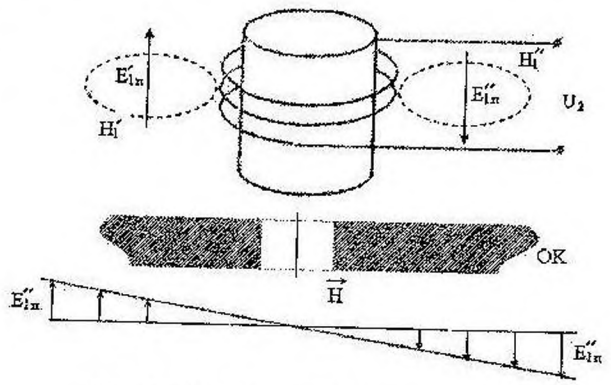

Рис. 4. Наводимая э.д.с в нормальных составляющих обмотки измерительной катушки

Таким образом, увеличение связи между катушками ВИП при внесении ОК в рабочий зазор можно объяснить только дискретностью структуры металлической пленки (островковое, пористое, сетчатое и т.п. строение).

Для подтверждения правильности настоящего объяснения были выполнены следующие экспериментальные исследования:

1. изменялась рабочая частота питающего тока;
2. применялись измерительные катушки различной высоты;
3. использовались три типа ВИП:
   - с двумя плоскими катушками;
   - с двумя цилиндрическими катушками;
   - с комбинацией плоской и цилиндрических катушек.

В качестве ОК применялись неферромагнитные металлические пленки на полимерной диэлектрической основе, изготовленные методом вакуумной конденсации на установке ВУП-2к при вакууме 2×10^{-6} тор, ОК отличались временем конденсации и соответственно внутренней структурой пленок (табл. 1).

Таблица 1

Экспериментальные структуры

Номер образца	Время конденсации $\tau_к$, с	Толщина, мкм	Материал
1	10	0,005	Al
2	15	0,007	Al
3	18	0,008	Al
4	20	0,009	Al
5	50	0,1	Al
1	6	0,005	Cr
2	9	0,008	Cr
3	12	0,009	Cr
4	18	0,01	Cr

Структура всех ОК контролировалась оптическим микроскопом и электронным типа МЛ-100Л. Сплошную структуру представляет алюминиевый образец №5.

На рис. 5 представлены типовые характеристики преобразования ВИП с цилиндрическими катушками (кривая 1) и плоскими катушками (кривая 2). Как следует из рисунка, характеристика 1 имеет вышеупомянутое увеличение U_2 в области малых толщин, а характеристика 2 соответствует по своей форме теоретической кривой. На рис. 6 представлены пять образцов алюминиевых пленок функции распределения выходного сигнала ВИП вдоль измерительного зазора $U_2(h_1)$ при цилиндрических катушках. Видно, что из пяти образцов пленок $U_2 > U_{20}$ проявляется у наиболее тонкого образца №1. Для сравнения на рис. 7 даны функции распределения $U_2(h_1)$ для тех же образцов, но с использованием плоских катушках. На этом рисунке ни одна из кривых не превосходит уровня U_{20}, отсюда следует, что ВИП с плоскими катушками практически не реагирует на пористость. На рис. 8 представлены функции $U_2(h_1)$ для четырех образцов хромовых пленок, проявивших увеличение значения U_2.

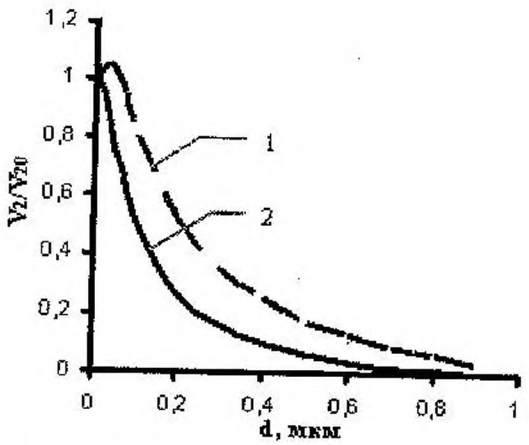

Рис. 5. Типовые зависимости модулей характеристик преобразования $N_o(d)$ для ВИП с цилиндрическими (1) и плоскими (2) катушками

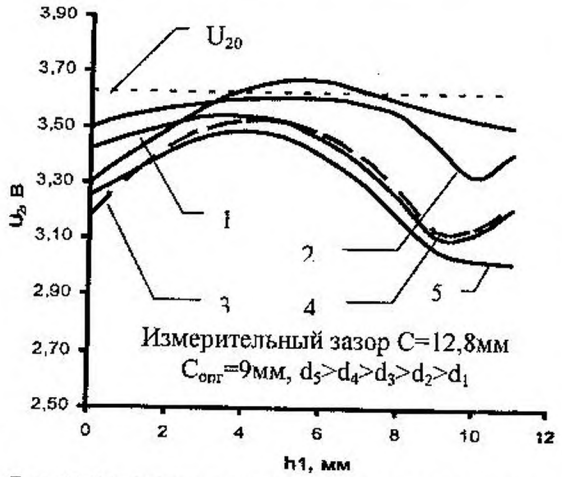

Рис. 6. Распределение выходного напряжения $U_2(h1)$ полосового ВИП с цилиндрическими катушками

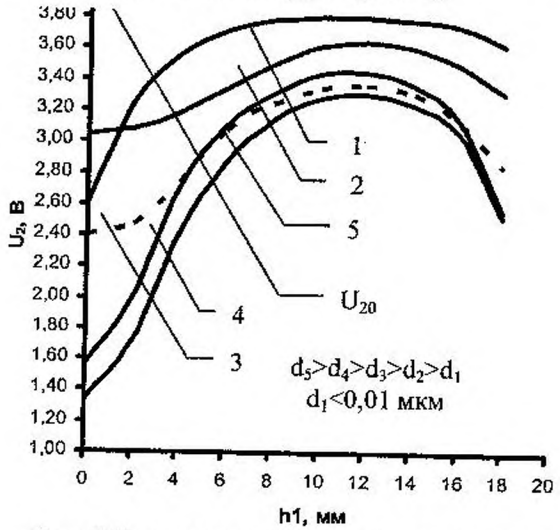

Рис. 7. Распределение выходного напряжения U2(h1) полосового ВИП с плоскими катушками для алюминиевых ОК

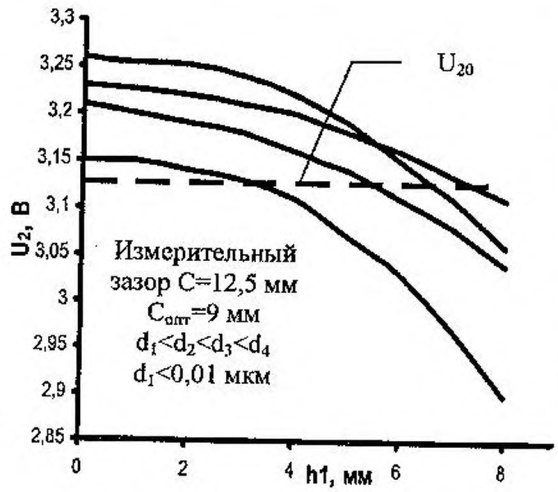

Рис. 8. Распределение выходного напряжения U2(h1) полосового ВИП с плоскими катушками для хромовых ОК

Анализируя на рис. 6 и рис. 8 характеристики распределения $U_2(h_1)$ тонких пористых пленок, следует обратить внимание на то, что у этих пленок сама форма кривых распределения имеет заметное отличие от теоретических кривых, особенно в области повышенной чувствительности ВИП. Иначе говоря, пористость структуры материала образцов вызываст изменения и в форме кривых распределения. Превышение выходного сигнала U_2 наблюда-

ется до некоторой величины α, при которой пленка приобретает сплошную структуру. Экспериментально на 15 образцах алюминиевых пленок было установлено, что распределение становилось «пористым» при $d \approx 0{,}02$–$0{,}03$ мкм. При применении плоских катушек некоторое искажение функции распределения $U_2(h_1)$ также имеется (рис. 7), но эти искажения значительно меньше и вызваны несовершенством конструкции плоских катушек.

ЗМІСТ

НАВІГАЦІЯ

Баранов Г.Л., Носовський А.М., Васько С.М. Геометричне моделювання в системах навігації і управління об'єктами у складних обставинах руху 2
Олійник П.Б., Тєут В.М. Автоматична ідентифікація параметрів судна 6
Хомяков Э.Н., Наумова Е.Э., Медведев В.Н. Оценка вектора состояния неподвижного потребителя с автокомпенсацией тропосферной погрешности измерения кодовых псевдодальностей 12
Цулая А.В. Методология выбора аппаратуры адаптивного СВЧ-компенсатора помех для контрольно-корректирующих станций 18

РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОТЕХНІКА

Карлов В.Д., Сирык Ю.А., Тугай А.В. Статистические характеристики эхо-сигналов, отраженных от групповой цели, при локации её в декаметровом диапазоне радиоволн 24
Костенко П.Ю., Васюта К.С., Слободянюк В.В., Яковенко Д.С. Использование суррогатных сигналов для повышения качества оценки параметров регулярных и хаотических сигналов, наблюдаемых на фоне аддитивного шума ... 28
Невцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В. Метод енергетичного виявлення радіосигналів 33

ПИТАННЯ УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

Азаренков Н.А., Посухов А.С., Семененко В.Е., Стервоедов Н.Г. Механизмы и феноменологическая модель процесса ускорения диффузии при механических и радиационных нагрузках 38
Андрашов А.А., Харченко В.С., Рева Л.А., Головир В.А., Шугаев А.Ю. Верификация алгоритмов электронных проектов ПЛИС для систем аварийной защиты ядерных реакторов 45
Бабенко В.Г., Кучеренко С.Ю., Зажома В.М. Моделирование позиционных избыточных систем счисления 51
Баранник В.В., Колтун Ю.Н. Модель динамического представления видеоданных в многоуровневом дифференциальном полиадическом пространстве 55
Баранник В.В., Скрынык А.П., Королева Н.А. Модель оценки информативности структурного описания координат вершин сплайнов нулевого порядка 59
Белей С.М., Остапів В.В., Піндус Н.М., Чеховський С.А., Луцик Р.П. Визначення вологості природного газу за іншими його фізико-хімічними параметрами 64
Водотыка С.В. Использование итерационных методов при оценивании параметров калибровочных зависимостей ... 69
Голованова М.А. Информационная технология выбора вариантов технологических процессов в условиях машиностроительного производства 73
Гринев Д.В. Методы сегментации изображений в системе распознавания объектов 78
Дейнеко В.М., Ткаченко А.О., Резніков Ю.В., Поляков А.В. Розробка методу контроля рівня інструментальних похибок кодових GNSS-вимірів 82
Дейнеко Ж.В., Кириченко Л.О. Оценивание параметра Хёрста для временных рядов с трендом методом вейвлет-преобразования 85
Жихаревич В.В., Чайка Л.О., Остапов С.Е. Розробка криптостійкого генератора бінарних псевдовипадкових послідовностей на основі клітинних автоматів 90
Жолткевич Г.Н., Тави М. Об одной математической модели квантового автомата 94
Запорожец О.В., Коротенко В.А., Овчарова Т.А. Компенсация нелинейности функции преобразования измерительных устройств с помощью искусственной нейронной сети 99
Іващенко М.М., Єрмолаєв В.А. Аналіз існуючих еталонів електричної напруги змінного струму 104
Капура И.А., Коняхин Г.Ф., Сотников А.М. Результаты численных расчетов модели защитного устройства на основе высокотемпературных сверхпроводников 107
Киселёв А.Ю. Анализ особенностей применения flash-технологии при создании рекламных сайтов 112
Коняхин Г.Ф., Косиков С.А. О параметрическом методе оценки однородности материалов 115
Кораблев Н.М., Макогон А.Э., Лебедев О.Г. Синтез нейросетевого нечеткого регулятора адаптивной системы управления нелинейным динамическим объектом 119
Криводубский О.А., Шевчук О.Л. Логико-формальные модели планирования строительно-монтажных работ на верхнем уровне системы управления 124
Крук О.Я. Математическое моделирование процессов формирования биологических потенциалов 128
Кулагін К.К., Мішуков О.М., Чумак Б.О. Математична модель обробки вимірювальної інформації засобами полігонного вимірювально-обчислювального комплексу 134
Леонов И.Г., Присяжный А.Е., Сидоренко Д.С. Особенности экспериментальных лабораторных исследований с применением программы системного проектирования радиоэлектронных устройств SystemView 139
Новосельцев И.В., Аксак Н.Г. Показатели эффективности нейросетевой системы медицинской диагностики 142
Олищук С.А., Волк М.А. Анализ процессных алгебр и их использование в задачах распределенного имитационного моделирования 150
Ольховиков С.В. Повышение надежности системы электроснабжения летательного аппарата 154
Поляков Г.А., Толстолужская Е.Г., Толстолужская В.В. Формальная семантико-числовая спецификация коммуникационных топологий параллельных вычислительных систем 158
Приходько С.И., Волков А.С. Метод кодирования алгебраическим каскадным сверточным кодом на базе синтеза процедур вычисления сверток 165
Риб'як А.С., Лебедєва Т.Є., Товста І.П. Використання динамічної спектральної фільтрації в оптико-електронних системах ідентифікації особи за спектральними ознаками райдужки ока 169
Рудницький В.М., Федотова-Півень І.М. Нормалізація цілих чисел в рекурентних системах числення третього порядку з допомогою структурно-блокових кодів 172
Светличный В.А., Тулупов В.В. Контроль пористости тонких неферромагнитных пленок с помощью вихретокового измерительного преобразователя 176

ISSN 2073-7394

МІНІСТЕРСТВО ПРОМИСЛОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ

ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління»

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Випуск 4(16)

Заснований у 2007 році

Наукове періодичне видання, в якому відображені результати наукових досліджень з розробки та удосконалення систем управління, навігації та зв'язку у різних проблемних галузях.

Засновник:
Державне підприємство «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління».

Адреса редакційної колегії:
Україна, 04073, Київ, вул. Фрунзе, 160/20.

Телефон: +38 (044) 463-99-22 (консультації, прийом статей).

E-mail:
office.nav.u@nbi.com.ua.

Інформаційний сайт:
www.csri.kiev.ua

Реферативна інформація зберігається: у загальнодержавній реферативній базі даних „Україніка наукова" та публікується у відповідних тематичних серіях **УРЖ „Джерело"**.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Голова:
КОЗЕЛКОВ Сергій Вікторович (*д-р техн. наук, проф.*)

Заступник голови:
БАРАНОВ Георгій Леонідович (*д-р техн. наук, проф.*)

Члени:
БОГОМЬЯ Володимир Іванович (*канд. техн. наук, с.н.с.*)
ВАСИЛЕНКО Олександр Васильович (*канд. техн. наук, с.н.с.*)
ДОВБНЯ Володимир Вікторович (*канд. військ. наук, с.н.с.*)
ІЛЬЇН Олег Юрійович (*д-р техн. наук, проф.*)
КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович (*д-р техн. наук, проф.*)
ЛУХАНІН Михайло Іванович (*д-р техн. наук, проф.*)
МАШКОВ Олег Альбертович (*д-р техн. наук, проф.*)
МЕДВЕДЄВ Валерій Павлович (*д-р техн. наук, проф.*)
МІТРАХОВИЧ Михайло Михайлович (*д-р техн. наук, проф.*)
МОРГУН Василь Андрійович (*д-р іст. наук, проф.*)
МОСОВ Сергій Петрович (*д-р військ. наук, проф.*)
ПАШКОВ Дмитро Павлович (*канд. техн. наук, доц.*)
ПЕШЕХОНОВ Володимир Григорович (*академік РАН, д-р техн. наук, проф.*)
СКОРИК Євген Тимофійович (*д-р техн. наук, проф.*)
СТАВИЦЬКИЙ Сергій Дмитрович (*канд. техн. наук, с.н.с.*)
СТАСЄВ Юрій Володимирович (*д-р техн. наук, проф.*)
СУХАНОВ Костянтин Георгійович (*канд. техн. наук, с.н.с.*)
ТОЛУБКО Володимир Борисович (*д-р техн. наук, проф.*)
ТУПКАЛО Віталій Миколайович (*д-р техн. наук, проф.*)
УРУСЬКИЙ Олег Семенович (*д-р техн. наук, проф.*)
ХОРОШКО Володимир Олексійович (*д-р техн. наук, проф.*)
ЧЕРЕПКОВ Сергій Тимофійович (*канд. техн. наук, доц.*)
ЯВТУШЕНКО Анатолій Миколайович (*канд. військ. наук, проф.*)

Відповідальний секретар:
КУЧУК Георгій Анатолійович (*канд. техн. наук, с.н.с.*)

Секретар:
КОЗЕЛКОВА Катерина Сергіївна (*канд. техн. наук, с.н.с.*)

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор

Затверджений до друку Вченою радою ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління» (протокол № 10 від 14 грудня 2010 року)

Занесений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою президії ВАК України від 16.12.2009 р., № 1-05/6 (технічні науки, № 75; бюлетень ВАК України, № 1, 2010)

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 12154-1038Р від 28.12.2006 р.

© ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління»

Синотин А.М., Колесникова Т.А. Аналитические исследования точности методов регулярного теплового режима, используемых для экспериментального определения эффективной теплопроводности нагретых зон РЭА 180
Степаненко Ю.Г. Метод формування ансамблів складних сигналів шляхом перестановки часових інтервалів .. 183
Хавина И.П. Перспективные стратегии решения задачи синтеза оптимального производства изделий 187
Халимон Н.Ф. Оценивание характеристик стохастической взаимосвязи метеорологических элементов аэродрома для решения задач прогноза условий полета 192
Черепнев И.А., Новиков В.Е. Неравновесная термодинамика состояний биологических объектов и электрофизические модели биологических мембран 197
Чухрай А.Г., Педан С.И. Метод реализации внутреннего цикла в компьютерном обучении алгоритмизируемым задачам 207

ОРГАНІЗАЦІЙНЕ УПРАВЛІННЯ

Губин В.А. Модель слабоструктурированных текстовых документов 213
Иванов В.Г., Иванов С.В., Клименко В.Н. Создание центров нормализации функционального состояния – безопасность жизнедеятельности и труда 216
Украинец А.Г., Фролов М.Ю. Структурирование требований к программному обеспечению на примере системы управления электронным архивом 219
Цуканов В.Ю. Использование теории мультимножеств при моделировании организационных систем 225

ПИТАННЯ УПРАВЛІННЯ В ЗБРОЙНИХ СИЛАХ

Бойко В.О., Семененко О.М., Бойко Р.В., Іванов В.Л. Формування підходів щодо оцінювання ефективності способів бойового застосування засобів радіоелектронної боротьби 228
Трофименко П.Є., Макеєв В.І. Вплив обертання і форми Землі на політ некерованих літальних апаратів 231
Турковський О.С., Володін М.І., Першина Е.Ю., Капранов В.О. Архітектура перспективних автоматизованих систем управління охороною і обороною військової частини 235

ЗАПОБІГАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Адаменко М.І. Зниження масштабів екологічного впливу аварій на потенційно небезпечних об'єктах шляхом їх своєчасного виявлення 240
Дендаренко В.Ю. Оцінка впливовості причин виникнення пожеж за результатами досліджень індуктивних моделей 243
Шевченко В.В., Лизан И.Я., Шевченко С.Е. Проблемы обеспечения эффективности пожарной автоматики на блоках АЭС 246

ЗВ'ЯЗОК

Дьяков М.М., Трикоз В.П. Дослідження способів побудови та характеристик лазерної атмосферної лінії зв'язку 251
Козелкова Е.С. Анализ построения системы передачи данных на базе штатного РТР «Поток» 254
Кузниченко В.С. Цифровой корреляционный метод анализа OFDM сигналов в системах автоматического радиомониторинга 257
Олейник В.В., Леонов И.Г., Катков В.П. Адаптивный комплекс обнаружения каналов утечки информации в сотовых сетях стандарта GSM 260

ХРОНІКА ТА ІНФОРМАЦІЯ 264

НАШІ АВТОРИ 266

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК 270

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 4 (16)

Відповідальний за випуск *Г.А. Кучук*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 12154-1038Р від 28.12.2006 р.

Комп'ютерна верстка: *І.А. Лебедєва, В.В. Кірвас*
Оформлення обкладинки: *І.В. Ільїна*

Техн. редактор *І.А. Лебедєва* Коректор *Р.Ю. Жермельова*

Підписано до друку 20.12.2010 Формат 60×84/8 Папір офсетний
Гарнітура «Times New Roman» Друк – різограф Ум.-друк. арк. – 34,0 Обл.-вид. арк. – 33,65
Ціна договірна Наклад 180 прим. Зам. 1220-10

Адреса редакції: Україна, 03150, Київ, вул.Фрунзе, 160/20, тел. (044) 463-99-22
ДП "Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління"

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП «АЗАМАЄВ В.Р.»
Свідоцтво про державну реєстрацію В02 № 229278 від 25.11.1998 р.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції – серія ХК № 135 від 23.02.05 р.
м. Харків, вул. Познанська, 6, к. 84, тел. 8 (057)362-01-52