



НАЦИОНАЛЬНЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н.Е. ЖУКОВСКОГО  
“ХАРЬКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ”

# **ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Специальный выпуск  
«Новые технологии в машиностроении»**

**Сборник научных трудов  
Выпуск 3 (63)**

**Юбилейный. Посвящен 80-летию ХАИ**

2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

**Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»**

ISSN 1818-8052

***ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА  
КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ***

***СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК  
«НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»***

***3(63) июль – сентябрь 2010***

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

**Издается с января 1984 г.**

*Выходит 4 раза в год*

**Юбилейный. Посвящен 80-летию ХАИ**

Харьков «ХАИ» 2010

Учредитель сборника **Национальный аэрокосмический университет**  
научных трудов **им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»**

Утвержден к печати ученым советом Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», протокол № 7 от 23.06.2010 г.

---

---

**Главный редактор** **Яков Семенович Карпов**, д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины

**Редакционная коллегия** **В.Е. Гайдачук**, д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины (заместитель главного редактора);  
**С.А. Бычков**, д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии Украины;  
**А.В. Гайдачук**, д-р техн. наук, проф.;  
**А.Г. Гребеников**, д-р техн. наук, проф.;  
**В.Ф. Забашта**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., лауреат Государственной премии Украины;  
**Д.С. Кива**, д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины;  
**В.В. Кириченко**, канд. техн. наук, проф.;  
**В.Н. Кобрин**, д-р техн. наук, проф.;  
**В.Н. Король**, д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии Украины;  
**М.Ю. Русин**, д-р техн. наук, проф.;  
**В.И. Сливинский**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.;  
**М.Е. Тараненко**, д-р техн. наук, проф.;  
**П.А. Фомичев**, д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии Украины

**Ответственный секретарь** **О.В. Ивановская**, канд. техн. наук, доц.

---

---

**Свидетельство о государственной регистрации КВ № 7344 от 27.05.2003 г.**  
За достоверность информации несут ответственность авторы.  
При перепечатке материалов ссылка на сборник научных материалов обязательна.

---

---

© Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», 2010 г.

## ***Специальный выпуск***

В настоящем номере публикуются материалы XX международной конференции «Новые технологии в машиностроении», проходящей с 3 по 8 сентября 2010 г.

**Редакторы  
выпуска:**

**В.С. Кривцов**, проф. д-р техн. наук, Заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины;

**Г.И. Костюк**, проф., д-р техн. наук.

**Редакционная  
коллегия:**

**А. Андерс** (США), проф., д-р;

**К.В. Безручко**, проф., д-р техн. наук;

**Н.И. Бобырь**, проф., д-р техн. наук;

**А.Н. Диденко**, проф., д-р физ.-мат. наук, член-корр. РАН;

**А.И. Долматов**, проф. д-р техн. наук, Заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины;

**С.А. Клименко**, проф., д-р техн. наук;

**Д. Кениг** (Германия), проф., д-р;

**Г.А. Кривов**, проф., д-р техн. наук, лауреат Государственной премии Украины;

**Б.В. Лупкин**, проф., д-р техн. наук;

**И. Миттерау** (Австрия), проф., д-р;

**Е.П. Мышелов** (Россия), проф., д-р техн. наук;

**З.Т. Назарчук**, проф., д-р техн. наук, академик НАНУ;

**С.А. Никитин** (Россия), проф., д-р экон. наук;

**Г.А. Попов**, проф., д-р техн. наук, член-корр. РАН;

**Н.С. Равская**, проф., д-р техн. наук;

**Н.Э. Тернюк**, проф., д-р техн. наук;

**О.Е. Федорович**, проф., д-р техн. наук;

**Хуа Линь** (Китай), проф., д-р.

В выпуске печатаются статьи по следующим направлениям:

- 1. Электрофизические и нанотехнологии.**
- 2. Технологические и прочностные аспекты надежности объектов машиностроения.**
- 3. РТК и компьютерные технологии.**
- 4. Аэрогидродинамика.**
- 5. Импульсные технологии.**
- 6. Физика технологий.**

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Актуальність теми зумовлена головною проблемою сучасного роботобудування – необхідністю створення більш досконалих систем відтворення рухів різноманітних промислових модулів, зокрема роботів та автоматичних маніпуляторів, відповідно до підвищених вимог щодо швидкодії і динамічних якостей у широких діапазонах швидкостей і навантажень.

Метою роботи – є дослідження точності позиціонування маніпулятора як однієї з найважливіших характеристик промислового робота, що у значною мірою визначає можливість його застосування для конкретного виробничого процесу.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

– визначення можливих складових помилок від різноманітних впливів;

– розгляд методів їх компенсації.

Точність програмного руху маніпулятора промислового робота (МПР) у загальному випадку може бути оцінена детермінованими і випадковими складовими помилок від задавальних впливів, керувальних або збурювальних. Кількісною величиною, що визначає точність позиціонування МПР, – є помилка позиціонування – різниця між фактичним положенням умовної точки його робочого органу (РО) і точкою, заданою програмою.

Особливістю МПР – є різноманітність їхніх кінематичних схем, а точність позиціонування чи відтворення заданого контуру траєкторії, значною мірою залежить від точності підтримки приводами необхідних значень кутових швидкостей.

Рух РО робота у загальному випадку визначається роботою пристрою керування ним; отже, помилки керування неминуче ведуть до помилок положення РО у просторі. На жаль, діючі стандарти містять недостатню інформацію про очікувані значення тих первинних помилок, з яких складаються помилки керування. Ця прогалина потребує серйозного вивчення й узагальнення наявних відомостей щодо даного питання.

Джерелом помилок позиціонування МПР може бути привод, причому навіть тоді, коли пристрій керування працює ідеально, без помилок. Залежність кутових переміщень у шарнірах маніпулятора  $\alpha$  від моментів  $M$ , що розвиваються приводами, описана в [1] і зоснована на

визначенні матриці динамічних коефіцієнтів впливу (коефіцієнтів інерції)  $B$ :

$$\mathbf{b}_n = B \cdot M_n, \quad (1)$$

де  $B$  – квадратна матриця, розміром  $(n \times n)$ ;

$M_n$  – імпульсні обертальні моменти;

$\mathbf{b}_n$  – імпульсні кутові переміщення;

$n$  – число ланок маніпулятора.

Елементами квадратної матриці  $B$  є коефіцієнти впливу  $b_{ks}$  ( $k = 1, 2, \dots, n; s = 1, 2, \dots, n$ ). З них тільки один діагональний елемент  $b_{nn}$  є сталою величиною ( $b_{nn} = \text{const}$ ), інші піддані параметричним змінам з боку зміни кутів  $\alpha_k$  взаємного розвороту ланок:

$$b_{kk} = f(\alpha_{k+1}, \dots, \alpha_n), \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (2)$$

У такий спосіб коефіцієнти інерції є відомими функціями конфігурації руху МПР. Наприклад, для  $n = 2$  момент інерції у першому шарнірі  $J_1$  є функцією кута повороту другого шарніра  $\alpha_2 = \dot{\alpha}_2 \cdot t$  [1]:

$$J_1 = P - Q \cos(\dot{\alpha}_2 \cdot t), \quad (3)$$

де  $P$  і  $Q$  – сталі коефіцієнти, зумовлені масами і розмірами ланок МПР.

Помилка позиціонування МПР виникає як при зміні задавального впливу з боку напруги якірного ланцюга двигуна  $U_d$ , так і з боку збурювального впливу, яким є момент опору  $M_c$ , а також (що характерно практично для всіх маніпуляторів) стан самого маніпулятора (зміна його конфігурації, маси вантажу тощо), тобто момент інерції в попередньому шарнірі (3).

Помилка від задавального впливу  $\theta_U(t)$ , звичайно, носить випадковий характер (перешкоди, шуми, стрибки напруги тощо), похибки такого типу можуть бути виміряні й опрацьовані методами математичної статистики і узагальнені. Загальний принцип вимірювання похибок привода полягає ось у чому: на його вхід подається строго стабілізований сигнал, а на виході вимірюється похибка.

У науці, техніці та масовому виробництві виробів часто доводиться мати справу з експериментами, операціями чи явищами, що багаторазово повторюються у незмінних умовах. При цьому, незважаючи на сталість основних умов, яких ретельно додержуються при окремих експериментах, результати їх завжди тією чи іншою мірою відрізняються

між собою, тобто вони характеризуються випадковим розподілом або підлягають йому.

Розглянемо другу складову помилки з боку збурю вального впливу,  $\theta_M(t)$ . Ця група причин появи помилок позиціонування МПР пов'язана з тим, що в процесі роботи його маніпулятор як розімкнена система, утворює пружнозчленовану з кількох ланок консоль з великим вильотом і набуває значної податливості. Зазначимо, що ця група причин у ряді випадків має велику питому вагу у загальному балансі вихідної похибки позиціонування МПР.

Вивчаючи вплив цих причин на точність позиціонування МПР, слід розглянути задачі статичної і динамічної точності. До першої з них звертаються тоді, коли прикладені до МПР зовнішні сили можна вважати сталими. При змінах статичного моменту  $M_c$  стаціонарний рух маніпулятора ( $\dot{\alpha}_k = \text{const}$ ) порушується, настає динамічний режим ( $\dot{\alpha}_k \neq \text{const}$ ), при якому велике значення має вплив конфігурації МПР.

Відповідно до [2] сумарна помилка

$$\theta_{\Sigma}(t) = \theta_U(t) + \theta_M(t). \quad (4)$$

Таким чином, найбільш істотною складовою сумарної помилки  $\theta_{\Sigma}(t)$  є помилка за збуренням  $\theta_M(t)$ , що залежить від змінного моменту інерції МПР і статичного моменту  $M_c$  що змінюється.

Одним зі способів підвищення точності позиціонування є принцип комбінованого керування, тобто сполучення принципу керування за відхиленням і принципу керування за збуренням. Математичною основою побудови високоякісних комбінованих систем керування промисловими роботами є теорія інваріантності [3].

Скористаємося структурною схемою електроприводу постійного струму промислового робота [3]. При цьому трохи змінимо її (рис. 1), а саме, приймемо електромагнітну сталу часу такою, що дорівнює нулю і введемо контур положення (кута повороту).

Відповідно до [1] зображення сумарної помилки має вигляд

$$\theta_{\Sigma}(p) = \theta_U(p) + \theta_M(p), \quad (5)$$

де  $\theta_U(p)$  – складова помилки, яка спричиняється зміною задавального впливу,  $U_{\text{я}}(p)$ ;

$\theta_M(p)$  – складова помилки, викликана збурю вальним впливом  $M_c(p)$ .

З аналізу отриманої структурної схеми після її перетворення рівняння (5) набуде вигляду:

$$\theta_{\Sigma}(p) = \frac{Jp^2}{Jp^2 + c_e c_M p + c_M c_{\alpha}} \cdot U_{\Sigma}(p) + \frac{c_e p + c_{\alpha}}{Jp^2 + c_e c_M p + c_M c_{\alpha}} \cdot M_c(p). \quad (6)$$

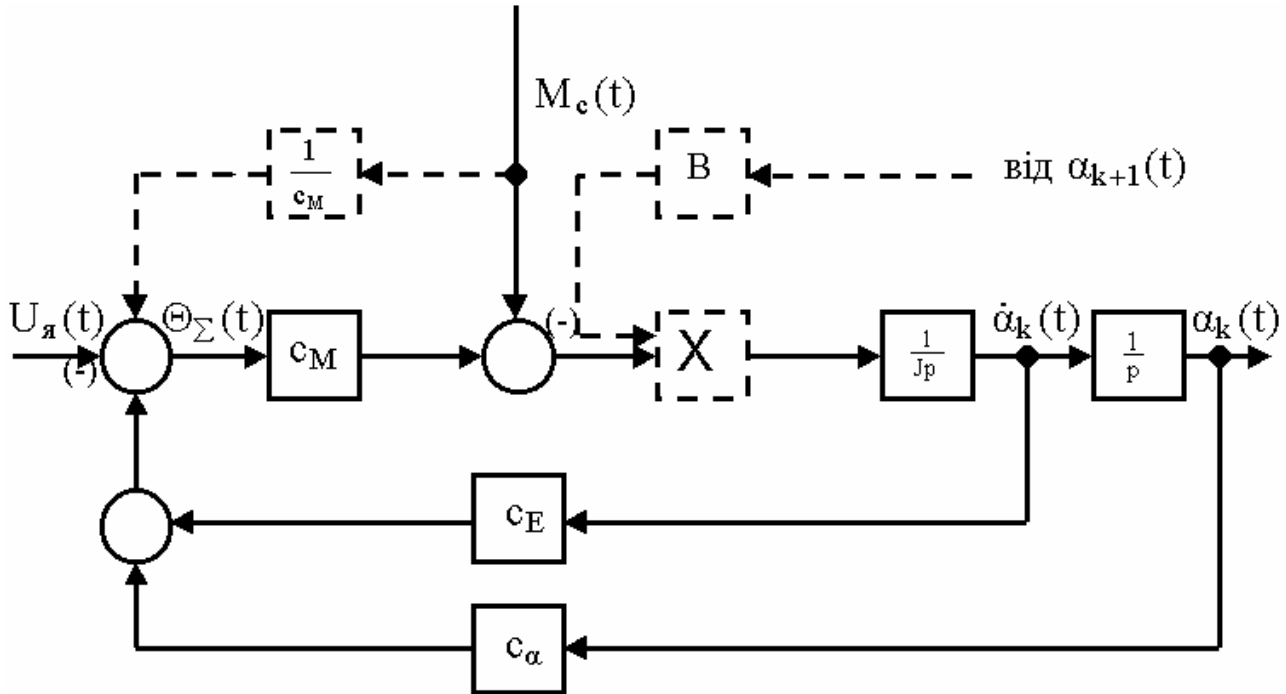


Рисунок 1 – Структурна схема електроприводу МПР з компенсацією,  $c_{\alpha}$ ,  $c_E$ ,  $c_M$  – постійні коефіцієнти

Надалі будемо дотримуватись рекомендацій, даних у [2].

Складову помилки позиціонування МПР із боку статичного моменту опору  $M_c$ , компенсуємо доданими в структурну схему електроприводу МПР додаткового зв'язку за  $M_c$  через ланку  $\frac{1}{c_M}$  (див. пунктирну лінію на

рис. 1).

Від складової помилки, що залежить від моменту інерції, який у свою чергу залежить від кута повороту в наступному шарнірі, можна позбутися, якщо у структурну схему ввести аналогову або цифрову еталонну модель, з функцією  $J_M = J(\alpha_{k+1})$ .

До складу цієї моделі входять вимірювач (датчик) кута  $\alpha_{k+1}$ , обчислювач функції  $J(\alpha_{k+1})$  і блок перемноження (рис. 1). За умови повної компенсації  $M_c$  та ідеально-точного моделювання  $J_M = J(\alpha_{k+1})$  динамічна помилка електроприводу МПР буде визначатися тільки виразом



$$\theta_{\Sigma}(p) = \frac{Jp^2}{Jp^2 + c_e c_M p + c_M c_{\alpha}} \cdot U_{\Sigma}(p). \quad (7)$$

Умова абсолютної інваріантності щодо задавального впливу  $U_{\Sigma}$ , і можливість його реалізації у комбінованих системах докладно подана у [2].

Наукові результати складаються з проведених досліджень, які показали, що найбільшої ефективності при компенсації помилок позиціонування можна досягти при застосуванні принципу комбінованого керування, який дозволяє реалізувати деякі структурні перетворення системи керування МПР. При цьому забезпечуються висока швидкодія та найвища точність траєкторії руху, що мають важливе значення для розвитку теорії побудови виконавчих пристроїв динамічних об'єктів і спеціальних модулів, що виконують різноманітні технологічні операції.

Практичні результати можуть бути використані при застосуванні наведених методів компенсації помилок позиціонування МПР, у цехах з верстатами ЧПК і промисловими маніпуляторами.

Що стосується порівняння з найкращими аналогами, додамо, що іноді в літературі висловлюється припущення, що первинні помилки досить малі і ними можна знехтувати. На нашу думку, цього робити не слід, оскільки надійність роботи електронних схем ще недостатньо висока. Звичайно, можна розмежувати помилки пристроїв керування МПР і помилки його механічної системи, розглядаючи їх окремо, але нехтувати перші не слід.

Таким чином, для досягнення мети була розглянута суть проблеми – дослідження точності позиціонування МПР (шляхом моделювання) як найбільш складної і найменш вивченої складової розділу динаміки маніпуляторів, яка, у свою чергу, зводиться до задач визначення можливих складових помилок від різноманітних впливів, а також методів їх компенсації шляхом застосування принципу комбінованого керування, що реалізовано за допомогою структурних перетворень системи керування МПР.

### Список використаних джерел

1. Худяев А.А. Кинематика систем воспроизведения движений / А.А. Худяев. – Х.: УИПА, 2000. – 132 с.
2. Костюк В.І. Робототехніка / В.І. Костюк, Г.О. Спину, Л.С. Ямпольський. – К.: Вища школа, 1998. – 447 с.
3. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

## Содержание

<i>Вниманию авторов</i> .....	5
<b>1. Электрофизические технологии</b>	
<b>Костюк Г.И., Суккариех Мустафа Эззат, Воляк Е.А.</b> Создание наноструктур в объеме детали при электроннолучевой обработке.....	8
<b>Мелкозерова О.М.</b> Образование наноструктур TiN в поверхностном слое железа при действии ионов различных сортов, зарядностей и энергий.....	24
<b>Горлов А.К., Рогачев Е.П., Жуков А.М., Лашко С.Н.</b> Исследование точности нанесения металла при дозированной аргонодуговой наплавке.....	31
<b>Костюк Г.И., Широкий Ю.В., Лобанова Л.В.</b> Образование наноструктур при действии ионизирующего излучения на материалы.....	37
<b>Баранов О.О., Романов М.С.</b> Эффективная ионная очистка в разряде планарного магнетрона со структурой полого катода.....	50
<b>Мустафин К.А.</b> Математическое моделирование поверхностной твердости при ионно-плазменном азотировании.....	58
<b>Костюк Г.И., Фадеев В.А., Бруяка О.О.</b> Повышение работоспособности покрытий на РИ при обработке сталей с учетом адгезионного взаимодействия.....	63
<b>Воропай Р.В., Бреус А.А.</b> Сравнительный анализ микроструктурных и наноструктурных покрытий и зависимость микротвердости от раз мера зерна.....	73
<b>Костюк Г.И., Исяк К.П., Бруяка О.О.</b> Перспективы получения наноструктур в объеме детали при действии потоков плазмы.....	77
<b>2. Технологические и прочностные аспекты надежности</b>	
<b>Манохин А.С., Клименко С.А.</b> Методика определения температуры резания при обработке инструментом с ПКНБ.....	92
<b>Пермяков А.А., Пациора А.П.</b> Исследование процесса износа режущей части головок глубокого сверления при обработке отверстий больших диаметров.....	99
<b>Костюк Г.И., Фадеев А.В., Куринной А.Н., Босенко Т.П.</b> Исследование износа РИ с покрытием при его моделировании на машине трения.....	104
<b>Иващенко Е. В., Литвин М. В., Добротворский С. С.</b> Исследование влияния зажимных усилий на качество обрабатываемой детали типа «фланец».....	113

<b>Костюк Г.И., Филиппенко А.И., Исяк К.П., Костюк А.Н.</b> Экспериментальное исследование шероховатости поверхности деталей при чистовом точении стали 30X14A PИ с покрытием 0,8ZRN+0,2HFN и без него.....	117
<b>Резниченко Н.К., Шелкунова Н.Л.</b> Унификация технологических процессов сборки-разборки соединений с натягом.....	129
<b>Костюк Г.И., Степаненко В.Н., Костюк Е.Г., Костюк А.Н., Карамышев Ю.Ю.</b> Деформация стружки после полустогового точения стали 39ХС и сплава ЭИ702 и чистового точения жаропрочной стали 30X14A PИ с покрытиями.....	134
<b>Мовшович А.Я., Белик В.Н., Кочергин Ю.А.</b> Обратная технологическая оснастка для многооперационного оборудования и гибких производственных систем.....	141
<b>Стрельчук Р.М., Узунян М.Д.</b> Исследование особенностей взаимодействия алмазных кругов с наноструктурным твердым сплавом.....	149
<b>Резниченко Н.К., Мовшович А.Я., Ищенко И.Г.</b> Конструктивные особенности системы направления и её влияние на работоспособность обратимой технологической оснастки.....	157
<b>Костюк Г.И., Миргородский А.Ю., Хаки Махмуд Салех</b> Силы резания при обработке конструкционных материалов твердыми сплавами с различными покрытиями.....	165
<b>Невлюдов И.Ш., Омаров М.А., Палагин В.А., Разумов-Фризюк Е.А.</b> Использование метода Байесовских статистических решений для выбора варианта технологического процесса.....	173
<b>3. Робототехнические комплексы и информационные технологии</b>	
<b>Невлюдов И.Ш., Великодний С.С., Фомовська О.В.</b> Моделирование электромеханической части. Манипулятора промышленного робота.....	181
<b>Невлюдов И.Ш., Великодний С.С., Фомовская Е.В.</b> Построение годографов Михайлова при помощи пакета «Mathcad».....	186
<b>Сысоев А.Ю., Костюк Г.И., Сысоев Ю.А.</b> Методологические характеристики барботажного метода создания смесей газов.....	194
<b>Невлюдов И.Ш., Проценко М.А., Хатнюк И.С., Аллахверанов Р.Ю.</b> Анализ современных технологий изготовления гибридных микросборок.....	200
<b>Гавва В.М., Раздымаха Т.П.</b> Економічне обґрунтування доцільності підвищення надійності й довговічності техніки.....	210
<b>Филипповская Л.А., Скачков А.Н.</b> Применение методов распознавания образцов в экспертных экономических системах.....	215

<i>Невлюдова В.В., Милютин С.С.</i> Метод голосового ввода информации.....	220
<b>4. Импульсные технологии</b>	
<i>Мазниченко С.А., Застела А.Н., Обрываева Т.Е.</i> Исследование процесса наполнения камеры сгорания приводов импульсных машин.....	224
<b>5. Аэро- и гидродинамика</b>	
<i>Ковалев Е.Д., Моцар П.И., Удовенко В.А.</i> Математические модели имитации динамики полета вертолета на комплексном тренажере на особых и критических режимах полета.....	228
<b>6. Физика технологий</b>	
<i>Рябков В.И. Толмачев Н.Г.</i> Возможности использования тахионной энергии в силовых установках летательных аппаратов.....	239
<i>Костюк Г.И., Миргородский А.Ю., Воляк С.Н.</i> Связь между коэффициентом трения покоя и адгезионным взаимодействием конструкционных материалов с материалом РИ при применении температуры и нормальной нагрузки.....	248
<i>Баранов О.О.</i> Эффективное управление распределением плотности ионного тока в системе для вакуумно-дугового осаждения покрытий.....	262
<i>Kostyuk G., Pavlenko V., Voliak E.</i> Emission and erosion processes, thermoelastic and thermoplastic deformation in cathode spots of gas.....	273
<i>Сысоев Ю.А.</i> Инициирование вакуумно-дугового разряда в технологических источниках плазмы.....	280
<i>Сыпченко И.А.</i> О влиянии условий осаждения на структуру, фазовый состав и свойства алмазоподобных пленок углерода...	296
<i>Сысоев Ю.А., Костюк Г.И., Белявский А.В., Сысоев А.Ю., Воропай Р.В., Бреус А.А.</i> Подавление микродуг в ионно-плазменных процессах.....	304
<i>Рефераты</i> .....	311