



ВЕСТНИК Машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

5
2015

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

*Журнал входит в перечень утвержденных
ВАК РФ изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней*

Журнал переводится на английский язык,
переиздается и распространяется
во всем мире фирмой
"Аплертон Пресс" (США)



ООО «Издательство Машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Стромынский пер., 4.

Телефон: 8-(499)-268-38-58

Факс: 8-(499)-269-48-97

Адрес редакции:

107076, Москва,

Колодезный пер., д. 2А.

Телефон: 8-(495)-661-38-80.

E-mail: vestmash@mashin.ru

www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г.
за № 77-12421 в Комитете Российской Федерации
по печати

Учредитель: А.И. Савкин

Индексы: **70120** ("Роспечать"),
27841 ("Пресса России"),
60264 ("Почта России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Оригинал-макет: ООО «Авансд солешнз».

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Сайт: www.aov.ru

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Алешин Н.П., д-р техн. наук, акад. РАН, **Братухин А.Г.**, д-р техн. наук, **Воронцов А.Л.**, д-р техн. наук, **Гусейнов А.Г.**, д-р техн. наук, **Дмитриев А.М.**, д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), **Драгунов Ю.Г.**, д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Древаль А.Е.**, д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), **Кутин А.А.**, д-р техн. наук, **Омельченко И.Н.**, д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), **Кузин В.В.**, д-р техн. наук, **Попов Д.Н.**, д-р техн. наук, **Попов А.В.**, д-р техн. наук, **Рыбин В.В.**, д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Трегубов Г.П.**, д-р техн. наук, **Скугаревская Н.В.** (ответственный секретарь)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Драгунов Г. Д., Лоскутников И. А. — Модель механизма переключения передач в раздаточной коробке с изменяемым межосевым расстоянием	3
Мерзликina Н. В., Секацкий В. С., Титов В. А., Пикалов Ю. А. — Выбор параметров зубчатой передачи как исполнительного механизма универсального измельчителя сырья	9
Иванов А. С., Смирнов Н. И., Муркин С. В., Ермолаев М. М. — Влияние пластических деформаций микронеровностей на сопротивление усталости винтов резьбовых соединений погружных центробежных насосов при их нагружении пульсирующей отрывающей силой.	14
Юр'ев Г. С., Рыков А. А. — Пассивное автоматическое управление виброзащитой объекта	17
Румянцев Л. А. — Анализ новых планетарных коробок передач	22
Шетулов Д. И., Кравченко В. Н., Мыльников В. В. — Прогнозирование показателей прочности и долговечности деталей автомобиля на основании модели усталостного разрушения конструкционных материалов	28
Бетковский Ю. Я. — Анализ и идентификация колебаний конструкций с использованием двухмассовой модели	31

Dragunov G. D., Loskutnikov I. A. — Model of gear shifting mechanism in transfer case with variable axis-to-axis distance	3
Merzlikina N. V., Sekatskiy V. S., Titov V. A., Pikalov Yu. A. — Selection of parameters of tooth gear as actuating mechanism of universal comminutor of raw materials	9
Ivanov A. S., Smirnov N. I., Murkin S. V., Ermolaev M. M. — Influence of plastic deformations of microasperities on fatigue strength of screws of threaded joints of sinking centrifugal pumps at their loading by pulsating tearing force	14
Yur'ev G. S., Rykov A. A. — Passive automatic control on vibration protection of object	17
Rumyantsev L. A. — Analysis of the new planetary gearboxes	22
Shetulov D. I., Kravchenko V. N., Myl'nikov V. V. — Forecasting of strength and durability indexes of automobile parts on the base of fatigue failure models of structural materials	28
Betkovskiy Yu. Ya. — Analysis and identification of vibrations of structures using two-mass model	31

Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки

Problems of tribology — friction, wearing away and lubrication

Гольдфарб В. И., Решетников С. М., Трубачев Е. С., Харанжевский Е. В., Кузнецов А. С., Корнилов А. А. — Экспериментальное исследование материалов опор скольжения колеса и смазочных материалов в низкоскоростных тяжело-нагруженных спиральных редукторах.	35
---	----

Gol'dfarb V. I., Reshetnikov S. M., Trubachev E. S., Kharanzhevskiy E. V., Kuznetsov A. S., Kornilov A. A. — Experimental research of materials of wheel slider bearings and lubricants in low-speed heavy-loaded spiroid reducers	35
--	----

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

MANUFACTURING ENGINEERING

Ивашов Е. Н., Кузнецов П. С., Федотов К. Д. — Оптимизация управления параметрами метрологического обеспечения при производстве МЭМС-гироскопов	40
Панин В. Г. — Выкатываемость кольцевых профилей швеллерного типа для газотурбинных двигателей.	45
Юркевич В. В., Бабин М. С. — Измерение траекторий формообразования с помощью акселерометров	50
Щедрин А. В., Поляков А. О., Сергеев Е. С., Зинин М. А. — Влияние предварительного деформирования на параметры режущего прошивания отверстия	51
Пухальский В. А., Пухальский П. В. — Выбор критерия восстановления режущих свойств инструмента на производстве	55

Ivashov E. N., Kuznetsov P. S., Fedotov K. D. — Optimization of parameters control of metrological assurance at manufacturing of MEMS-gyroscopes	40
Panin V. G. — Expansion ability of ring profiles of channel type for gas turbine engines	45
Yurkevich V. V., Babin M. S. — Measurement of trajectory of shape generation using accelerometers	50
Shchedrin A. V., Polyakov A. O., Sergeev E. S., Zinin M. A. — Influence of predeformation on parameters of cutting broaching	51
Pukhal'skiy V. A., Pukhal'skiy P. V. — Selection of criterion of cutting properties restoration of a tool in production conditions	55

Проблемы теории и практики резания материалов

Problems of theory and practice of materials cutting

Лапшин В. В., Грубый С. В. — Повышение точности и качества алмазной лезвийной обработки плоских поверхностей	57
Кузнецов А. П. — Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Часть 4. Структуры оборудования для обработки резанием	63
Залогова В. М., Нагорный В. В. — Контроль состояния фрезы по звуку, сопровождающему процесс фрезерования.	77
Козочкин М. П. — Исследование процесса резания в условиях автоколебаний	81

Lapshin V. V., Grubiy S. V. — Improvement of accuracy and quality of diamond edge cutting machining of plane surfaces	57
Kuznetsov A. P. — Structures of processes and equipment of cutting processes. Part 4. Structures of equipment of cutting processing	63
Zaloga V. M., Nagorniy V. V. — Control of mill state by sound, accompanying to the milling process	77
Kozochkin M. P. — Research of cutting process under self-vibrations	81

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

TECHNICAL INFORMATION

Кухарев О. Н., Семов И. Н. — Устройство для многослойного нанесения покрытий на сферические элементы	87
--	----

Kukharev O. N., Semov I. N. — Device for applying of multi-layer coatings on spherical elements	87
---	----

Технический редактор *Т. А. Шацкая*
Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 05.03.2015. Подписано в печать 14.04.2015.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

УДК 62.01/.09:621.865.8

Е. Н. ИВАШОВ, д-р техн. наук, П. С. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, К. Д. ФЕДОТОВ
(НИУ Высшая школа экономики), e-mail: eivashov@hse.ru

Оптимизация управления параметрами метрологического обеспечения при производстве микроэлектромеханических гироскопов

Рассмотрены задачи идентификации параметров и оптимального управления при производстве МЭМС-гироскопов. Приведены уравнения динамики гироскопической системы в матричной форме и уравнения граничных условий. Исследованы подходы максимумов правдоподобия для множества параметров, что повышает точность МЭМС-гироскопа. Представлен обзор выпускаемых МЭМС-гироскопов.

Ключевые слова: МЭМС-гироскоп, управление, параметры, идентификация параметров, оптимальное управление.

The problems of parameters identification and optimal control at production of MEMS-gyroscopes are considered. The equations of dynamics of gyroscopic system in matrix form and equations of boundary conditions are given. The maximum likelihood approaches are investigated for variety of parameters, which increases the accuracy of a MEMS-gyroscope. The overview of produced MEMS-gyroscopes is presented.

Keywords: MEMS-gyroscope, control, parameters, identification of parameters, optimal control.

Оптимизация управления параметрами метрологического обеспечения представляет собой задачу идентификации параметров в теории управления и связи, при этом оценка неизвестных параметров эквивалентна минимизации. Данный подход можно использовать в принятии технического решения при выборе МЭМС-гироскопа.

Допустим, что динамика рассматриваемой системы для равноотстоящих моментов дискретного времени определяется уравнением

$$x_{i+1} = ax_i + u_i,$$

где x_i — значение переменной состояния, т. е. положение; u_i — значение сигнала на входе в i -й момент.

Будем считать, что все значения u_i известны и для упрощения принимаем $x_0 = 0$.

Переменная x_1 наблюдается при наличии ошибок измерения в виде

$$y_{i+1} = x_i + n_i, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где y_1 — наблюдаемое значение; n_1 — ошибка измерения.

Будем полагать, что n_i ($i = 1, 2, \dots$) — независимые гауссовы случайные переменные с нулевым среднеквадратичным σ и дисперсией σ^2 . Таким образом, функция совместной плотности вероятности помех имеет вид:

$$p(n_1, n_2, \dots, n_l) = \prod_{i=1}^l \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-n_i^2/2\sigma^2}. \quad (1)$$

Уравнение динамики и уравнение наблюдения удобно записывать, используя векторные обозначения: $\hat{y}_l = \hat{x}_l + \hat{n}_l$, где $\hat{x}_l = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_l)^T$; \hat{y}_l и \hat{n}_l определяются аналогично.

Определим \hat{u}_l как $\hat{u}_l = (\hat{u}_0, \hat{u}_1, \dots, \hat{u}_{l-1})^T$. При этом динамика системы выражается уравнением

$$\mathbf{G}\hat{x}_l = \hat{u}_l, \quad (2)$$

где $\mathbf{G} = \mathbf{I} - \hat{a}\mathbf{S}$ — $(l \times l)$ -матрица; \mathbf{S} — матрица, у которой элементы $S_{i+1,i} = 1$ ($i = 1, 2, \dots, l-1$), остальные элементы равны нулю.

Теперь получим оценку \hat{a} для a методом максимального правдоподобия, т. е. \hat{a} должно максимизировать выражение $p(\hat{y}_l | \hat{a}, \hat{x}_l)$. Эта максимизация осуществляется в два этапа в виде:

$$\max_a \max_{x_l} p(\hat{y}_l | \hat{a}, \hat{x}_l),$$

где

$$p(\hat{y}_l | \hat{a}, \hat{x}_l) = p(\hat{n}_l = \hat{y}_l - \hat{x}_l). \quad (3)$$

Внутренняя максимизация ограничена условием (2). Правая часть уравнения (3) определяется уравнением (1).

Данная максимизация эквивалентна минимизации выражения показателя степени $\min_a \min_{x_l} \mathbf{E}_l$ при

условии $\mathbf{G}\hat{x}_l = \hat{u}_l$, где $\mathbf{E}_l = (\hat{y}_l - \hat{x}_l)^T (\hat{y}_l - \hat{x}_l) / 2\sigma^2$.

Ограничивающее уравнение учтем с помощью множителей Лагранжа. Введя векторный множитель $\hat{\lambda}_l$ Лагранжа, можно минимизацию показателя степени \mathbf{E}_l относительно x_l при условии (2) записать как

$$\min_{x_l} \mathbf{J},$$

где

$$\mathbf{J} = \mathbf{E}_l - \langle \hat{\lambda}_1, \mathbf{G} \hat{x}_l - \hat{u}_l \rangle. \quad (4)$$

Полагая, что градиент функции \mathbf{J} равен нулю, получим:

$$(\hat{x}_l - \hat{y}_l)/\sigma^2 - \mathbf{G} \hat{\lambda}_1 = 0.$$

Подставив последнее выражение в выражение (4), найдем:

$$\hat{\lambda}_1 = -(\mathbf{G}\mathbf{G}^T)^{-1}(\mathbf{G} \hat{y}_l - \hat{u}_l)/\sigma^2.$$

Таким образом, минимальное значение функции \mathbf{J} составит:

$$\mathbf{J}^* = (\mathbf{G} \hat{y}_l - \hat{u}_l)^T (\mathbf{G}\mathbf{G}^T)^{-1} (\mathbf{G} \hat{y}_l - \hat{u}_l) / \sigma^2. \quad (5)$$

Согласно определению матрицы \mathbf{G} в выражении (2) можно записать:

$$\mathbf{G} \hat{y}_l - \hat{u}_l = (\hat{y}_l - \hat{u}_l - \mathbf{S} \hat{y}_l) \mathbf{a},$$

где $\mathbf{a} = (1, \hat{a})^T$.

Тогда выражение (5) будет иметь вид:

$$\mathbf{J}^* = \mathbf{a}^T (\hat{y}_l - \hat{u}_l - \mathbf{S} \hat{y}_l)^T (\mathbf{G}\mathbf{G}^T)^{-1} (\hat{y}_l - \hat{u}_l - \mathbf{S} \hat{y}_l) \mathbf{a} / \sigma^2.$$

Таким образом, установлено, что при оценивании по максимуму правдоподобия целевой функцией является \mathbf{J}^* , которая есть функция от \mathbf{a} с резко выраженной нелинейностью. Если $\mathbf{G}\mathbf{G}^T$ аппроксимировать выражением $(1 + a^2)\mathbf{I}_l$, то приближенную оценку по максимуму правдоподобия можно найти минимизацией:

$$\min_{\mathbf{a}} \mathbf{a}^T \mathbf{Y} \mathbf{a} / \mathbf{a}^T \mathbf{a}.$$

Здесь

$$\mathbf{Y} = (\hat{y}_l - \hat{u}_l - \mathbf{S} \hat{y}_l)^T (\hat{y}_l - \hat{u}_l - \mathbf{S} \hat{y}_l) =$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_1^l (\hat{y} - \hat{u}_{i-1})^2 & \sum_2^l (\hat{y} - \hat{u}_{i-1}) \hat{y}_{i-1} \\ \sum_2^l (\hat{y}_{i-1} - \hat{u}_{i-1}) \hat{y}_{i-1} & \sum_2^l \hat{y}_i^2 \end{bmatrix},$$

где целевая функция представляет собой отношение квадратичных форм.

Данный метод распространяется на динамические системы, содержащие k неизвестных параметров, и на системы более общего вида, однако очевидно, что при этом минимизация становится более трудной вычислительной задачей.

Выработку требований к значениям конкретных показателей метрологического обеспечения образцов осуществляли в соответствии с работой [1] на основании анализа технических требований к изделию.

При отсутствии достаточной информации о значениях вероятностей ложных и необнаруженных отказов в соответствии с работой [1] допускается характеризовать метрологические звенья требуемыми и фактическими значениями коэффициентов

точности, отражающих соотношение между допускаемыми отклонениями и суммарной погрешностью измерений и выбираемых из ряда 2,5; 3; 3,5; 4; 5 в зависимости от значимости параметра (большей значимости параметра соответствует более высокий коэффициент точности). Показатели же достоверности методик измерительного контроля образцов (вероятности ложных и необнаруженных отказов) по известным характеристикам погрешности измерений при контроле и по параметрам методик контроля можно получить способами, приведенными в работе [2].

Выбираем коэффициент точности измерения параметров из ряда, приведенного в работе [1], т. е. не менее 2,5. Выбранное значение $K_{т.тр}$ уточняют определением значения коэффициента d , характеризующего выход параметра за верхнюю или нижнюю границы поля допуска. Для этого нормируют величину $d/\delta_{и}$, где $\delta_{и}$ — допускаемое отклонение параметра, распределенного в соответствии с нормальным законом, выбираем $\delta_{и} = 3\sigma$. Оценка d , в соответствии с работой [1], позволяет оставить $K_{т.тр} = 2,5$ с учетом уточнения с точностью до второй значащей цифры [2]. Перечень контролируемых параметров изделия приведен ниже.

Контролируемые параметры для датчиков угловой скорости (ДУС)

Диапазон преобразования, градус/с	От -500 до 500
Плотность мощности шума (случайная составляющая нулевого сигнала) 3σ , градус/Гц/с	Не более 0,014
Нестабильность масштабного коэффициента, %	Не более 0,1
Нестабильность нуля, градус/ч	Не более 8

Контролируемые параметры изделия выбраны в соответствии с рекомендациями работы [1], а также с учетом технических характеристик ММГ и назначения.

Признаки исключения контроля параметра:

информация по результатам контроля параметра не используется;

в системе с обратной связью контроль работоспособности осуществляется более чем в одной контрольной точке;

при контроле технического состояния контролируются взаимосвязанные параметры;

в ходе экспертизы (испытаний, эксплуатации) установлено, что значение контролируемого параметра стабильно во времени и не ухудшает характеристик аппаратуры;

анализ отказов аппаратуры при испытаниях (эксплуатации) показал, что параметр, предназначенный для индикации и поиска отказавшего типового элемента, на практике не используется и т. д.

Признаки необходимости контроля параметра:

значение параметра нестабильно во времени и существенно влияет на характеристики аппаратуры;

введение параметра в состав контролируемых параметров позволяет: упростить методику контроля или поиска отказавшего типового элемента замены; сократить продолжительность (объем) контрольных или профилактических операций; повысить достоверность контроля технического состояния аппаратуры [1].

Основной характеристикой изделия, устанавливающей зависимости оцифрованных значений выходного напряжения от угловой скорости, напряжения питания, температуры и силы тока нагрузки, является градуировочная характеристика изделия. Приведенные выше контролируемые параметры определяют на основании данных, полученных при снятии характеристики.

Определение времени готовности гиро-инерциального блока (ГИБ) и полосы пропускания ДУС осуществляется по отдельным методикам с помощью оборудования, приведенного в таблице.

Допустимые погрешности определения контролируемых параметров, а также точность задания входных воздействий (угловой скорости, линейного ускорения) определяются путем деления предельных погрешностей на коэффициент точности, равный 2,5.

Предельные значения погрешностей определения параметров движения с помощью ДУС (проекция вектора угловой скорости на ось чувствительности) рассчитывают по формуле

$$\Delta\omega_{\text{доп}} = \Delta\omega_1 + \Delta\omega_2,$$

где $\Delta\omega_1 = 3\sigma_\omega$; $\Delta\omega_2 = \Delta K_\omega \omega_{\text{max}}$; σ_ω — случайная составляющая нулевого сигнала ДУС; ΔK_ω — нестабильность масштабного коэффициента ДУС (см. таблицу).

Ряд задач по оптимальному управлению можно сформулировать как минимизацию специального вида, подчиненную одновременно ограничивающим равенствам и неравенствам, или как последовательность задач минимизации. Прежде всего рассмотрим систему управления, определяемую разностным управлением первого порядка:

$$\hat{x}^{i+1} = \mathbf{A}_i \hat{x}^i + \mathbf{B}_i \hat{u}^i, \quad (6)$$

где $0 \leq i \leq N-1$; $\hat{x}_i \in \mathbf{X}(i) \subset \mathbf{R}^n$; $\hat{u}^i \in \mathbf{U}(i) \subset \mathbf{R}^m$.

Вектор \hat{x}^i представляет собой вектор состояния системы в i -й момент времени; вектор \hat{u}^i — управляющий входной вектор. Множества $\mathbf{X}(i)$ и $\mathbf{U}(i)$ представляют собой ограничения, наложенные на вектор состояния и управляющий вектор.

Уравнения этого типа возникают при рассмотрении импульсных систем, а также при аппроксимации систем системами с дискретным временем. Это определяется тем, что при использовании цифровых машин для решения задач, связанных с управлением системами с непрерывным временем, осуществляется преобразование в системы с дискретным временем.

Для определенности выберем целевую функцию

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^N \omega(\hat{x}^i, \hat{u}^{i-1}). \quad (7)$$

При этом ω предполагается непрерывным относительно \hat{x} и \hat{u} .

Ограничивающие множества имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}(i) &= \{\hat{x}, \hat{g}^i - \mathbf{G}_i \hat{x} \leq 0\}, \quad 1 \leq i \leq N; \\ \mathbf{X}(0) &= \hat{x}^0 = \text{известное начальное состояние}; \\ \mathbf{U}(i) &= \{\hat{u}, \hat{h}^i - \mathbf{H}_i \hat{u} \leq 0\}, \quad 0 \leq i \leq N-1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь \hat{g} , \hat{h} , \mathbf{G} и \mathbf{H} — векторы и матрицы соответствующих размерностей.

Так, например, ограничение вида $a \leq x \leq b$ можно выразить как

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{I}_n \\ \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \hat{x} \leq \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix},$$

где \mathbf{I}_n — $(n \times n)$ -единичная матрица.

Векторы состояния можно исключить из выражения (7) и ограничивающих множеств (8), если использовать выражение (6) и в выражение (7) вместо \hat{x}^i подставить

$$\hat{x}^i = \varphi_{i,0} \hat{x}^0 + \sum_{j=0}^{i-1} \varphi_{i,j+1} \mathbf{B}_j \hat{u}^j,$$

где $1 \leq i \leq N$; $\varphi_{i,j} = \mathbf{I}$; $\varphi_{i+1,j} = \mathbf{A}_i \varphi_{i,j}$.

Перечень средств измерений и испытательного оборудования для измерительного контроля изделий

Наименование	Обозначение	Основные технические характеристики
Электронный термогигрометр в комплекте с термоэлектрическим преобразователем	CENTER-314	Измерение температуры от -200 °C до $+200$ °C с погрешностью ± 1 %. Измерение влажности до 98 % с погрешностью $\pm 2,5$ %
Ампервольтметр	UNI-T	Погрешность ± 1 %
Опорно-поворотный стенд	AC 1120 E	Угловая скорость не менее 500 °/с
Опорно-поворотный стенд с угловой вибрацией	Angular Vibration Table 105-AVT	Диапазон воспроизводимых частот от 0 до 200 Гц
Секундомер	—	$\pm 0,5$ с
Цифровой осциллограф	TDS 1002B	± 130 В ($\pm 0,1$ %); от 2 нс до 5 с ($\pm 0,033 \div 0,25$ %)

Примечание. Допускается замена средств измерения на аналогичные с техническими характеристиками не ниже представленных.

Теперь целевая функция является функцией от $\hat{u}^0, \dots, \hat{u}^{N-1}$:

$$\mathbf{J} = \rho(\hat{u}^0, \hat{u}^1, \dots, \hat{u}^{N-1}),$$

а ограничения имеют вид:

$$\hat{d}^i - \sum_{j=0}^{i-1} \mathbf{D}_{i,j} \hat{u}^j \leq 0 \text{ и } \hat{h} - \mathbf{H} \hat{u}^i \leq 0,$$

где $\hat{d}^i = \Delta \hat{g}^{i,j} - \mathbf{G}_i \varphi_{i,0} \hat{x}^0$; $\mathbf{D}_{i,j} = \mathbf{G}_i \varphi_{i,j+1}$.

Таким образом, мы преобразовали задачу оптимального управления в задачу минимизации с ограничениями. Можно было бы непосредственно выполнить минимизацию функции \mathbf{J} при условиях:

$$\hat{x}^{i+1} = \mathbf{A}_i \hat{x}^i + \mathbf{B}_i \hat{u}^i, \quad 0 \leq i \leq N-1;$$

$$\hat{g}^i - \mathbf{G}_i \hat{x}^i \leq 0, \quad 1 \leq i \leq N;$$

$$\hat{h} - \mathbf{H} \hat{u}^i \leq 0, \quad 0 \leq i \leq N-1.$$

Однако эта формулировка содержит намного больше переменных, чем предыдущая, и в общем случае оказывается неэффективной.

Динамика более общего вида описывается разностным уравнением

$$\hat{x}^{i+1} = f(\hat{x}^i, \hat{u}^i, i),$$

где $0 \leq i \leq N-1$; f — нелинейная векторная функция.

При выборе конкретного MEMS-гироскопа проанализируем существующие прототипы и серийно выпускаемые изделия. Приведенные выше решения будем использовать для анализа предоставленных производителем характеристик выпускаемых изделий.

Выбор из двух технологий изготовления гироскопов (кремний на стекле или кремний на изоляторе) основывается на возможности использования промышленного оборудования. Так как рассматриваемые технологии относятся к разным производствам — микроэлектроники и микромеханических устройств, то используемое оборудование, обеспечивающее соответствующие процессы, относится к разным группам. Оборудование первой группы выпускалось в СССР, но с переходом на импортную компонентную базу разработки данного оборудования значительно сократились. В настоящее время отечественными производителями данного оборудования являются: ОАО "НИИ Полупроводникового машиностроения" (г. Воронеж) — оборудование для фотолитографических процессов химии, ОАО "НИИТОП" (г. Нижний Новгород) — оборудование для монтажа и сборки, ООО "ЭСТО-Вакуум" — вакуумное оборудование для напыления, травления и осаждения, из стран СНГ — НГПО "Планар" (Беларусь, г. Минск) — оборудование для изготовления шаблонов, фотолитографии, включая

совмещение и экспонирование, сборочное и контрольное оборудование.

Имеется широкий выбор ручного, полуавтоматического и автоматического оборудования для стандартных процессов микроэлектроники, таких как вакуумное напыление, операций фотолитографии, химических обработок, термического окисления и т. п. Рассмотрим оборудование для специальных процессов в рамках выбранных технологии объемной микромеханики и технологии кремний на стекле. К данным процессам относятся:

глубокое плазмохимическое травление кремния и стекла;

двухстороннее соединение кремниевых и стеклянных пластин;

анодное соединение кремниевых и стеклянных пластин без потери точности совмещения;

утонение кремния на стекле.

Особенности оборудования для MEMS:

относится к высокоточному и дорогостоящему оборудованию, выпускается только под заказ для конкретной технологии с учетом требований заказчика на основе базовой комплектации; конкретное исполнение формируется с учетом опций, поэтому конечная стоимость может значительно отличаться от базового варианта;

выпускается, как правило, в двух модификациях: ручное или полуавтоматическое оборудование для НИОКР, мелкосерийного производства и пилотных производств; автоматическое оборудование с загрузкой через кассеты; в кластерном варианте для объединения с установками, осуществляющими смежные операции, т. е. автоматически полный цикл операций;

в последнее время оборудование предлагается вместе с технологиями и в стоимость включают пусконаладочные работы и обучение персонала.

Оборудование для основного процесса объемной микромеханики — глубокого плазмохимического травления кремния (стекла) выпускают несколько фирм. Сравнить оборудование по параметрам качества травления весьма сложно, так как процесс глубокого травления зависит не только от технических характеристик оборудования и используемых режимов, но и от размеров вытравливаемых зон, используемых материалов (например, пластина монокристаллического кремния или SOI-пластины, т. е. кремний на изоляторе), материалов масок, их качества, скорости травления.

Лидером в данном направлении является фирма SPTS Technologies Ltd, созданная в 2009 г. и использующая многолетний опыт в производстве оборудования компаний Watkins-Johnson и в разработке технологий Trikon, STS, Aviza. Фирма выпускает оборудование для травления кремния, диэлектриков, PVD и PECVD процессов. В сентябре 2012 г. фирма анонсировала технологию сухого травления для приложений по выявлению межсоедине-

ний. Модуль Pegasus Rapier обеспечивает скорость травления кремния, превышающую в 2 раза скорость аналогов, при этом однородность травления составляет $\pm 2,5$ % на TSW-пластинах диаметром 300-мм. Фирма изготавливает оборудование на разных платформах (вакуумная система + плазменное оборудование), основными являются VPX Pegasus ICP (DRIE), Etcher.

Известным производителем установок для глубокого плазмохимического травления является компания Oxford Instruments Plasma Technology — подразделение компании Oxford Instruments. Подразделение специализируется на полнофункциональных системах плазменной и плазмохимической обработки: системы для реактивного ионного травления (RIE), плазменно-стимулированного осаждения (PECVD), магнетронного распыления, ионно-лучевого травления и ионно-лучевого распыления, гидридной эпитаксии (HVPE) и атомно-слоевого осаждения (ALD). Достоинством компании является полная технологическая поддержка поставляемого оборудования и возможность обработки тестовых образцов заказчика до поставки оборудования. В настоящее время работает более 2500 установок производства данной компании. Большим достижением является установка PlasmaPro Estrelas100 для МЭМС приложений и процессов глубокого травления кремния (Deep Silicon Etch, DSE), которая реализует наиболее известные методы глубокого травления: Бош-процесс и криогенное травление.

Бош-процесс является ключевым технологическим процессом при производстве устройств микромеханики. Криогенное травление позволяет получать структуры с высоким аспектным соотношением и предельно малыми размерами, что незаменимо в области создания высокоточных МЭМС-гироскопов. Компании Oxford Instruments Plasma Technology и SPTS заявили о возможности травления SOI-пластин, т. е. о травлении кремния непосредственно на изоляторе без заметного подтравливания по разделу кремний—стекло.

В области полупроводникового оборудования лидером является компания Applied Materials (США), которая также выпускает установки для глубокого плазмохимического травления на платформе Centura. Последняя разработка включает в себя реакторную камеру DPS-DTM специальной конструкции и источник с индуктивно-связанной плазмой, что обеспечивает высокую скорость травления (до 20 мкм/мин), высокую однородность (менее 2 %), малую шероховатость боковой стенки.

Серийное оборудование для глубокого плазмохимического травления выпускает ООО "ЭСТО-Вакуум": вакуумное оборудование для магнетронного напыления, ионного и плазмохимического травления, осаждения диэлектрических слоев из

газовой фазы. С 2003 г. компанией выпущено более 70 различных установок. Для травления предлагаются автоматизированная установка плазмохимического и ионно-химического травления CAROLINE PE 12 и автоматизированная шлюзовая установка CAROLINE PE 15; скорость травления кремния не превышает 5 мкм/м. Установки можно использовать для травления металлов, диэлектриков и полупроводников. Однако не удалось найти информацию по глубокому травлению кремния с высоким аспектным отношением.

В России серийное оборудование для соединения (бондинга) пластин и их совмещения (в отличие от плазмохимического травления) не выпускается. В этой области лидерами являются компания Suss Microtec (Германия, США) и EVGroup (Австрия), которые производят близкое по техническим характеристикам и стоимости оборудование, причем технологические процессы совмещения пластин и бондинга разнесены по разным единицам оборудования. Совмещение пластин осуществляется на специальной оправке, где пластины закрепляются и далее поступают в бондер. Поэтому если при бондинге требуется точное совмещение, необходимо иметь установку для совмещения той же фирмы, что и бондер. Установки выпускают в ручном (полуавтоматическом), автоматическом и кластерном исполнении. Обе фирмы выпускают также кластеры оборудования, которые могут быть применены для изготовления МЭМС-приборов. Компания Suss Microtec выпускает установки совмещения системы Suss MA/BA 6, компания EVGroup — системы EVG 610 и EVG 620.

Компания Applied Microengineering Ltd (Великобритания) процесс точного совмещения перед соединением пластин и процесс бондинга совместила в одной установке, что позволяет осуществлять горячее совмещение, т. е. учитывать неточности, возникающие при нагревании в результате температурных расширений пластин и оснастки. Кроме того, стоимость такой установки значительно ниже стоимости установок совмещения и бондера. Как правило, бондеры оснащаются опциями, позволяющими выполнять кроме анодного соединения и прямой бондинг (диффузионную сварку), и соединения с помощью эвтектики, легкоплавким стеклом и даже с использованием клеевой композиции (процессы можно выполнять в вакууме и газовой среде).

Последняя операция — операция удаления балластного кремния (утонение), по сути, является шлифовкой и полировкой кремния и отличается от стандартной технологии утонения пластин с микросхемами наличием стеклянной основы, приваренной вместе с утоняемой кремниевой пластиной. При использовании в качестве исходного материала SOI операция утонения не требуется.

Выкатываемость кольцевых профилей для газотурбинных двигателей

Для прогнозирования выкатываемости и расширения технологических возможностей профилирования установлены зависимости между размерами исходной заготовки и выкатываемого профиля, полученного в одной паре валков. Разработанная методика подтверждена экспериментами и производственной практикой.

Ключевые слова: формообразование, профиль, швеллер, заготовка, сплав, раскатка, калибр, фланец, деформация.

For forecasting of expansion ability and extension of technological capabilities of profiling, the dependencies between dimensions of initial workpiece and expanded profile, obtained in the same roller pair, are determined. The developed methodic is confirmed by experimental data and field experience.

Keywords: forming, profile, channel, workpiece, alloy, expansion, gage, flange, deformation.

Выкатываемость — это степень соответствия действительной формы поперечного сечения профильной заготовки, полученной горячей раскаткой, заданной форме.

Для газотурбинных двигателей (ГТД) кольцевые детали изготавливают из бесшовных заготовок п-образного сечения, получаемых с помощью раскатных машин. Последовательности разных формообразований тонкостенных кольцевых деталей раскаткой представлены на рис. 1. При изготовлении данных деталей может применяться дополнительная раскатка в ящичных калибрах.

Каждая из применяемых раскаток имеет свои преимущества и недостатки, поэтому выбор технологического процесса изготовления данных деталей должен учитывать особенности заданного профиля [1–3].

При раскатке профильных колец главной задачей является обеспечение качественного заполнения калибров, поэтому при разработке технологического процесса необходим критерий заполнения калибра.

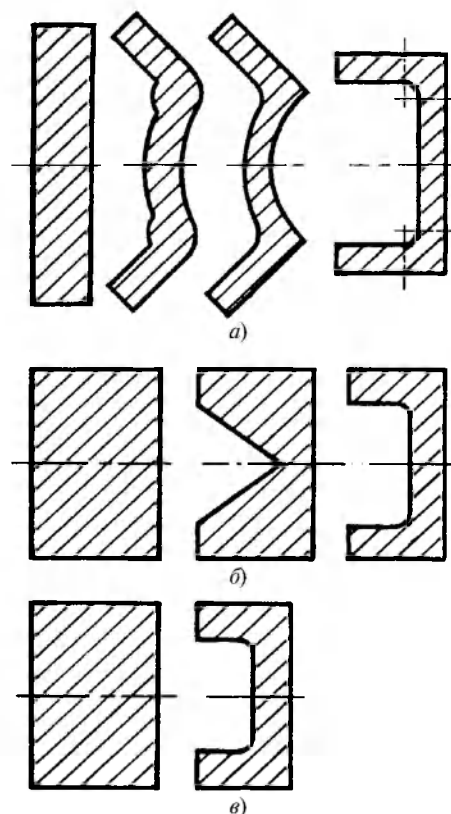


Рис. 1. Технологические схемы формообразования швеллера: а — раскаткой с отбортовкой; б — раскаткой с попеременным внедрением клиновидного и цилиндрического валков со стороны предполагаемых фланцев; в — раскаткой с внедрением цилиндрического валка



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 40)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. РД В 319.01.13—99. КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Оценка метрологического обеспечения. Мытищи. 1999.
2. МИ 2091—90. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения физических величин. Общие требования.
3. Устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием для специального технологического оборудования / В. А. Васин, Е. Н. Ивашов, П. С. Кузнецов, С. В. Степанчиков // Технология машиностроения. 2011. № 2 (104). С. 47—51.

4. Исследование устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием для сверхвысоковакуумного оборудования / П. С. Кузнецов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного машиностроения / Материалы международной науч.-техн. конф. "INTERMATIC—2011" / Под ред. чл.-корр. РАН А. С. Сигова. М.: МГТУ МИРЭА—ИРЭ РАН, 2011. Ч. 4. С. 232, 233.

5. Особенности применения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием в современном сверхвысоковакуумном контрольно-диагностическом и технологическом оборудовании / В. А. Васин, Е. Н. Ивашов, П. С. Кузнецов, С. В. Степанчиков // Контроль. Диагностика. 2011. № 2 (152). С. 44—48.