

УДК 681.4.02

В. И. Зава р з и н, В. И. А л е х н о в и ч,
А. И. Г о е в, А. А. Е ф р е м о в

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрена методика программного управления формообразованием высокоточных оптических поверхностей. В основу методики положена информация о форме оптической поверхности и алгоритм автоматического управления съемом припуска.

Крупные научно-технические достижения последнего времени в области астрономии, оптико-электронного зондирования Земли из космоса, космической и лазерной технологии в значительной степени стали возможны благодаря появлению новых высокоточных оптических систем. В связи с этим повысились требования к качеству поверхностей оптических деталей, увеличились их характеристики и габаритные размеры. Наряду с традиционными материалами, применяемыми при производстве оптических деталей (оптическими стеклами, кварцем, ситаллом и др.), все чаще используют нетрадиционные материалы (кремний, германий, бериллий и др.). Классические методы формообразования [1, 2] уже не могут в полной мере обеспечить возрастающие требования по виду и точности оптических поверхностей.

Безошибочное предсказание размеров и формы высокоточных оптических деталей возможно лишь в том случае, когда известны все причины, порождающие отклонения размеров. В реальных условиях практически все факторы, порождающие отклонения размеров, изменяются в процессе обработки поверхности случайным образом. Например, различие твердости заготовок даже в пределах одной поверхности, неравномерность припуска, состояние поверхности инструмента, распределение абразива, деформации при креплении и т.д. Поэтому при изучении свойств системы “станок–приспособление–инструмент–деталь” и при составлении ее математической модели необходимо рассматривать ее, учитывая случайный и неопределенный характер факторов, порождающих отклонения снимаемого припуска от расчетного.

Чем больше факторов, влияющих на форму деталей, будут учитываться системой управления, тем полнее будет информация, используемая для прогноза, тем меньше будет ошибка. Однако увеличение числа учитываемых факторов усложняет систему управления, делает ее менее надежной и менее управляемой.

Постановка задачи. Для производства высокоточных оптических деталей необходимо изготовление с высокой точностью оптических поверхностей. В последние годы вырос интерес к проблеме автоматизации технологических процессов обработки, к финишным операциям доводки точных оптических поверхностей. Цель применения систем автоматического управления точностью обработки (САУТО) — уменьшить отклонения от заданных размеров и формы обрабатываемых поверхностей.

В процессе реализации САУТО оптических поверхностей приходится использовать численные методы оптимизации. При использовании численных методов оптимизации для решения технических задач со многими переменными параметрами необходимо проводить большой объем вычислений. Поэтому внедрение методов оптимизации стало возможным после создания высокопроизводительных компьютеров. Вместо стандартных программ реально использовать пакеты программ, включающие в себя библиотеку различных алгоритмов для определения параметров процесса, вспомогательные и управляющие программы, организующие на ЭВМ процесс оптимизации.

Основная цель оптимизации — это минимизация отклонения кинематической программы $J(x)$ от функции распределения припуска на поверхности $Z(r)$:

$$\min F(x) = \|J(x) - KZ(r)\|,$$

где K — коэффициент пропорциональности между величиной управляющего сигнала и припуском; $r = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ — радиус круговой зоны обрабатываемой поверхности.

В свою очередь кинематическая программа — это функция многих переменных:

$$J(x) = f(\vec{p}_k),$$

где \vec{p}_k — вектор параметров настройки.

Задача минимизации функции многих переменных состоит в отыскании $\min F(x)$, где $x = [x', x'']$ — n -мерный вектор, $F(x)$ — по крайней мере, непрерывная функция. Численные методы решения приводят к некоторому итеративному процессу вида

$$x_{k+1} = x_k + C_k \varphi(x_k, k), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Значение функции $\varphi(x_k, k)$ и последовательности C_k определяют метод оптимизации.

В случае применения нелинейного программирования минимум функций многих переменных $\min F(x)$ определяют при наличии ограничений $f^i(x) = 0, i \in (1; l)$ и неравенств $f^j(x) \leq l, j \in [l + 1; m]$.

Для этого используют программы, реализующие методы с модифицированной функцией Лагранжа и простой итерации.

Решение задачи. Составим обобщенную функцию Лагранжа:

$$H(x, p) = F_X(x) + \sum_{i=1}^m \varphi(f^i(x), p_i),$$

где p_i — компонент вектора настройки \bar{p}_k .

Здесь введена некоторая, пока не определенная функция двух скалярных аргументов $\varphi(a, b)$, обладающая непрерывными частными производными. Обозначим ее через $\varphi'(a, b) = \frac{d\varphi(a, b)}{da}$.

Рассмотрим вспомогательную задачу безусловной минимизации обобщенной функции Лагранжа

$$H(x(p), p) = \min_x [F_X(x) + \sum_{i=1}^l \varphi(f^i(x), p_i)].$$

Предположим, что эта задача имеет решение. Тогда необходимое условие минимума состоит в равенстве нулю первой производной H по x :

$$H'_X(x(p), p) = F'_X(x\{p\}) + \sum_{i=1}^l \varphi' f'_X(x(p)) = 0.$$

Метод простой итерации приводит к следующей схеме:

$$p_{k+1}^i = \varphi'(f^i(x(p_k), p_k^i), p_k^i), \quad i \in [1; l].$$

Таким образом, программа оптимизации позволяет сравнить кинематические программы обработки и схемы расположения припуска и определить оптимальные параметры настройки, которые приведут к снятию требуемого остаточного припуска. Исходным для оптимизации значений управляемых параметров автоматизированной доводки является распределение отклонений размеров и форм обрабатываемой поверхности.

Расчетным (заданным) размером для вогнутых оптических поверхностей будем считать наименьший предельный радиус кривизны, а для выпуклых — наибольший. Тогда годная поверхность может иметь только положительные погрешности, не превышающие по абсолютной величине допуск. Привычные оценки со знаками плюс или минус, указывающие на наличие бугра или ямы, следует привести к принятой в машиностроении системе допусков.

Необходимо указать местоположение положительной погрешности в центре или на краю оптической поверхности. Это тем более целесообразно, так как обработку осуществляют снятием припуска по фактическому расположению погрешностей.

Отклонение формы поверхности или профиля называют отклонением формы реальной поверхности (реального профиля) от формы номинальной поверхности (номинального профиля) по нормали к последним.

Шероховатость поверхности не включают в отклонение формы, волнистость поверхности — включают.

В основу нормирования и количественной оценки отклонения формы поверхностей положен принцип введения прилегающих линий или поверхностей. Прилегающая линия соприкасается с реальным профилем и расположена вне материала так, чтобы отклонения от нее наиболее удаленной точки профиля в пределах нормируемого участка имели минимальное значение. Прилегающая окружность — цилиндр или сфера — это соответствующие геометрические фигуры минимального диаметра, описанные вокруг реального профиля наружной поверхности вращения, или максимального диаметра, вписанные в реальный профиль внутренней поверхности вращения.

При измерении прилегающими поверхностями служат рабочие поверхности стекол или поверхности волновых фронтов в эталонной ветви интерферометра.

Количественное отклонение формы оценивается наибольшим расстоянием от точек реальной поверхности (профиля) до прилегающей поверхности (профиля), до нормали к последней. Для оптических поверхностей применяемые различные толкования отклонений формы как местные, зональные, астигматические и другие ошибки не соответствуют принятой в машиностроении терминологии. Такие определения трудно интерпретировать количественно.

Можно применить единый принцип назначения допусков и межпереходных припусков, выражая их в линейной форме, получить которую можно пересчетом данных различных способов измерений.

Например, отклонение от плоскостности — это наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости в пределах нормируемого участка. Поле допуска плоскостности — это область в пространстве, ограниченная двумя параллельными плоскостями, отстоящими друг от друга на расстоянии, равном допуску плоскостности. Следует учесть специфику плоских исполнительных поверхностей, когда из общепринятой погрешности формы можно выделить свойственную оптической технологии погрешность размера, вписав или описав сферу, прилегающую к реальной поверхности.

Аналогично рассматривают погрешность формы для сферических и асферических поверхностей.

Следовательно, в общем случае отклонение формы заданной поверхности есть наибольшее отклонение точек реальной поверхности, определяемое по нормали к номинальной поверхности в пределах нормируемого участка.

Отклонением расположения поверхности или профиля называют отклонение реального расположения поверхности (профиля) от его номинального расположения. При оценке отклонений расположения, отклонения формы рассматриваемых поверхностей и базовых элементов не рассматривают.

Погрешность расположения фокусирующих исполнительных поверхностей оценивают отклонением расположения центров кривизны или фокусов поверхностей на геометрической оси детали.

Номинальные расположения поверхности определяются номинальными размерами (линейными и угловыми) между ними и базами или между рассматриваемыми поверхностями, если базы не даны. Реальное расположение поверхности определяется действительными линейными и угловыми размерами.

Волнистость поверхности, включаемая в отклонение формы, оценивается как периодически повторяющаяся (расстояние между вершинами выступов или углублениями впадин больше базовой длины, применяемой для оценки шероховатости). В оптической технологии волнистость проявляется при обработке малыми инструментами с небольшими размахами. В большинстве случаев профиль волнистости имеет форму, близкую к синусоидальной.

Исходя из определения отклонения формы реальной поверхности от номинальной, видно, что этим задается размещение и ориентация реальной поверхности в системе координат относительно вспомогательной поверхности — прилегающей, средней и т.д. Любой выбор вспомогательной поверхности, относительно которой определяют отклонение реальной поверхности от номинальной формы, может быть произволен. Однако следует учитывать сложившиеся в технологии обработки и контроля традиции, анализ схем расположения снимаемого припуска, возможности существующих и перспективных средств измерений, возможности машинной обработки результатов измерений и многие другие факторы. Должна ли вспомогательная (координатная) поверхность обязательно проходить внутри или вне материала оптической детали, или она может рассекают реальную поверхность так, чтобы различные ее точки располагались определенным образом. Каждый из этих подходов может быть аргументирован конструктивными, технологическими и метрологическими предпосылками и требованиями.

Обозначим через $X, Y \in D$ область определения функции $f(X, Y)$, описывающей реальную поверхность в некоторой системе координат. Пусть далее $\nu(X, Y, \vec{p})$ — уравнение искомой координатной поверхности; \vec{p} — вектор ее параметров.

В этих обозначениях меры близости реальной и вспомогательной поверхности записывают следующим образом:

$$\Gamma_1 = \left\| \nu(X, Y, \vec{p}) - f(X, Y) \right\|_{L_2}^2 = \iint_{X, Y \in D} \left[\nu(X, Y, \vec{p}) - f(X, Y) \right]^2 dX dY; \quad (1)$$

$$\Gamma_2 = \left\| \nu(X, Y, \vec{p}) - f(X, Y) \right\|_{L_1} = \iint_{X, Y \in D} \left| \nu(X, Y, \vec{p}) - f(X, Y) \right| dX dY; \quad (2)$$

$$\Gamma_3 = \left\| \nu(X, Y, \vec{p}) - f(X, Y) \right\|_C = \sup_{X, Y \in D} \left[\nu(X, Y, \vec{p}) - f(X, Y) \right], \quad (3)$$

где $\nu(X, Y, \vec{p}) \geq f(X, Y)$; L_2 — пространство функций, интегрируемых с квадратом по Лебегу; L_1 — пространство функций, интегрируемых по модулю; C — пространство непрерывных функций.

Соотношение (1) определяет квадратичную меру расстояния между функциями $f(X, Y)$ и $\nu(X, Y, \vec{p})$, соотношение (2) — линейную, а (3) — это форма так называемого равномерного приближения функций. Во всех трех случаях следует найти такой вектор \vec{p}_0 , который минимизирует выражение в правых частях равенств. Как известно, такой вектор служит решением системы уравнений $\vec{\nabla} \Gamma_i = 0$. Из соотношения (1) следует, что при $i = 1$ вектор \vec{p}_0 определяет поверхность, средний квадрат отклонения которой от реальной поверхности минимален. При $i = 2$ получаем поверхность, средний модуль отклонения которой от реальной поверхности минимален. Наконец, при $i = 3$ находим вектор параметров такой поверхности, максимальное расстояние которой от реальной поверхности минимально. При этом в первом и во втором случаях найденные поверхности пересекают реальную поверхность, а в последнем — касательны к ней.

После нахождения поверхности $\nu(X, y, \vec{p}_0)$ ее отклонения Δ от реальной $f(X, Y)$ определяют из следующего соотношения:

$$\Delta = \sup_{X, y \in D} \left| \nu(X, Y, \vec{p}_0) - f(X, Y) \right| - \inf_{X, Y \in D} \left| \nu(X, Y, \vec{p}_0) - f(X, Y) \right|.$$

Отклонения формы и размеров представляют не только амплитудными, но и спектральными характеристиками.

Медленное проникновение спектральных методов оценки отклонений формы оптических поверхностей связано с преимущественным использованием для обработки свободной притиркой полноразмерного инструмента. В связи с появлением автоматизированной доводки малым инструментом появилась проблема устранения “ряби”, т.е. волнистости с переменным шагом впадин и выпуклостей.

Кроме того, при обработке высокоточных, в особенности крупногабаритных оптических поверхностей, на их качество оказывает влияние множество погрешностей, возникающих на всех этапах ее обработки. Источниками погрешностей служат состояние исходного материала заготовки (наличие внутренних напряжений, свилей, пузырей, неоднородность состава и прочие), система базирования и крепления детали, напряжение и деформации, возникающие в процессе обработки и в результате тепловых воздействий, погрешности статической и динамической настройки системы “станок–приспособление–инструмент–деталь” и т.д. Кроме того, форма поверхности изменяется со временем в процессе контроля и эксплуатации изделия из-за механических и тепловых деформаций, постепенного снятия разного рода напряжений. При этом влияние даже каждой отдельной причины практически нельзя точно рассчитать и предсказать.

Практика обработки высокоточных крупногабаритных оптических поверхностей показывает, что погрешность формы соизмерима с отклонениями размеров. Это обстоятельство делает целесообразным рассмотрение погрешности обработки как отклонение текущего размера $R(\varphi, r)$ от номинального $R_0(r)$ (рис. 1.):

$$\Delta R(\varphi, r) = R_0(r) - R(\varphi, r),$$

где φ — угловая координата радиальной плоскости; r — координата круговой зоны поверхности; $R_0 = \text{const}$ — для сферы; $R_0(r) = f(X, Y)$ — для асферической поверхности.

С одной стороны, $\Delta R(\varphi, r)$ является характеристикой погрешности обработки поверхности, а с другой — эта величина, взятая с обратным знаком, является идеальным управлением положения инструмента по двум координатам x и φ , полностью ликвидирующим погрешность обработки.

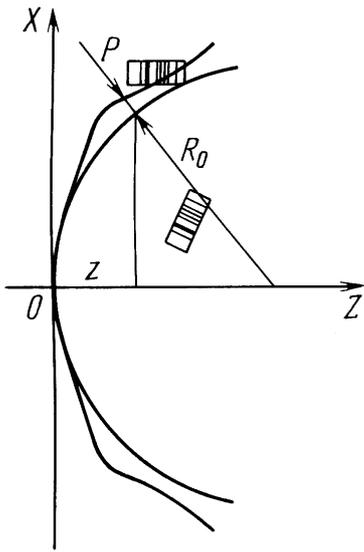


Рис. 1. Погрешность формы поверхности

Отклонения текущего размера конкретной поверхности, полученной после n -го сеанса обработки, определяется как сумма двух слагаемых:

$$\Delta R_n(\varphi, x) = \tilde{R}_n(\varphi, r) + R_n^0(\varphi, r),$$

где $\tilde{R}_n(\varphi, r)$ — низкочастотная составляющая неровностей поверхности; $R_n^0(\varphi, r)$ — отклонение неровностей этой поверхности от низкочастотной составляющей.

Эти слагаемые в общем случае при наличии неосесимметричных погрешностей рационально аппроксимировать двумерными полиномами Цернике, ортогональными на круге или кольце, в зависимости от формы оптической поверхности:

$$C_{nm}(r, \varphi) = r^n \cos m\varphi; \quad \tilde{R}_n(r, \varphi) = \sum_{k_1=1}^{n_1} \sum_{k_2=1}^{n_2} \alpha_{k_1 k_2} C_{k_1 k_2}(r, \varphi);$$

$$\alpha_{k_1 k_2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 r \Delta R_n(r, \varphi) C_{k_1 k_2}(r, \varphi) dr.$$

Зная значения $\tilde{R}_n(\varphi, r)$ и $R_n^0(\varphi, r)$, можно найти слагаемые среднего квадрата отклонений текущего размера $\sigma_{R_n^0}^2$ и $\sigma_{\tilde{R}_n}^2$:

$$\sigma_{R_n^0}^2 = \frac{1}{(P-1)(Q-1)} \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^Q \left[\Delta R_n(k\Delta\varphi, m\Delta x) - \tilde{R}_n(k\Delta\varphi, m\Delta x) \right]^2;$$

$$\sigma_{\tilde{R}_n}^2 = \frac{1}{(P-1)(Q-1)} \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^Q \left[\tilde{R}_n(k\Delta\varphi, m\Delta x) - \bar{R}_n \right]^2,$$

где P — число радиальных сечений; Q — число шагов разбиения профиля в радиальном сечении;

$$\Delta \bar{R}_n = \frac{1}{PQ} \sum \sum R_n(k\Delta\varphi, m\Delta x);$$

$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{P}$, $\Delta x = \frac{l}{Q}$; $2l$ — диаметр обрабатываемой поверхности.

На практике часто встречается ситуация, когда основную роль играет лишь одна из независимых переменных, а влиянием другой можно пренебречь. Поэтому математическую модель САУТО разработаем для функции одной переменной $F(x)$.

Чтобы составить алгоритмы будущей САУТО представим суммарный припуск $Z(\bar{p}, n)$ на n -м сеансе обработки следующим образом:

$$Z(\bar{p}, n) = a_{0n} + \sum_{i=1}^k a_{in} p^i + z_0(p).$$

Здесь a_{0n} определяет систематическую (для n -го сеанса) погрешность размера. Она равна отклонению систематической части профиля n -го сеанса обработки от заданного размера в точке $X = Y = 0$. Остальные члены определяют текущие систематическую и случайную составляющие части погрешности формы.

Принимая в качестве критерия полноты компенсации систематической погрешности величину $\xi_z^2(\bar{p})$, условие наилучшей компенсации можно записать в виде математического ожидания остаточного припуска:

$$\bar{\xi}_z^2(x) = M \left\{ \left[Z(p, n) - \sum_{i=0}^k \hat{a}_i p^i \right]^2 \right\},$$

где $\sum_{i=0}^k \hat{a}_i p^i$ — полином, описывающий процесс управления.

Автоматическое управление съемом припуска заключается в изменении режимов обработки или положения инструмента (подкладка), вызывающего ожидаемое изменение размера в корректируемом цикле обработки.

Дальнейшее развитие методов автоматической подналадки связано с расширением возможностей алгоритмов. Например, придание системе управления адаптивных свойств, при наличии которых структура или параметры алгоритма будут изменяться в зависимости от оценки качества результатов управления.

Если обозначать через U_n величину подналадочного импульса, вводимого на n -м цикле обработки, то об эффективности автоматической подналадки можно было бы судить по величине ошибки:

$$y_n^* = y_n - U_n,$$

где y_n — отклонение выдерживаемого размера поверхности без управляющего импульса U_n ; y_n^* — остаточная погрешность после приложения управляющего импульса U_n .

Так как эта ошибка случайна, в качестве показателя точности обработки с автоматической подналадкой примем ее средний квадрат:

$$M \{ (y^*)^2 \} = (\bar{y}^*)^2 = M \{ (y - U)^2 \}.$$



Рис. 2. Структурная схема процесса подналадки

В общей форме процесс автоматической подналадки может быть описан структурной схемой с обратной связью (на рис. 2).

Подналадка может реализоваться станком с запаздыванием на m тактов. Передаточная функция соответствующего звена будет z^{-m} . Для алгоритма подналадки, связывающего Δ_n и y_n^* , примем следующую операторную форму записи:

$$\Delta_n = W(\zeta, n)y_n^*,$$

где ζ — оператор сдвига, $\zeta y_n^* = y_{n+1}^*$; $\zeta^{-1}y_n^* = y_{n-1}^*$.

Конечной целью является определение характеристик корректора. Пользуясь обычными правилами преобразования передаточных функций, можно записать оператор системы с обратной связью:

$$H(\zeta, n) = \frac{W(\zeta, n)\zeta^{-m}}{1 + W(\zeta, n) \cdot \zeta^{-m}} = \sum_{j=0}^{\infty} h_j(n)\zeta^{-j},$$

где $h_j(n)$ — весовая функция замкнутой системы.

Используя правила преобразования передаточных функций, получаем выражение оператора ошибки системы:

$$H_e(\zeta, n) = \frac{1}{1 + W(\zeta, n)\zeta^{-m}} = 1 - H(\zeta, n).$$

Последовательность $\{y_n\}$ отклонений размеров поверхности в различных циклах обработки можно представить в виде

$$y_n = y_n^{0(k)} + c^{(k)}n + c_0^{(k)},$$

где $y_n^{0(k)}$ — центрированная случайная последовательность, при постоянных условиях обработки она является приближенно стационарной; c^k — скорость смещения настройки за шаг (за одну подналадку); c_0^k — ступенчатое смещение настройки; при $k = 1$ отклонение поверхности равно погрешности начальной настройки.

Применяя оператор ошибки системы, получим:

$$[1 - H(\zeta, n)]y_n^0 = e_n^{(0)}$$

— центрированную составляющую ошибки;

$$[1 - H(\zeta, n)] \bar{c}_0 = \bar{c}_0 e_n^{(1)}$$

— ошибку, обусловленную погрешностью начальной настройки и ступенчатыми изменениями настройки;

$$[1 - H(\zeta, n)] \bar{c}n = \bar{c}e_n^{(2)}$$

— ошибку, обусловленную линейным смещением настройки.

Таким образом, суммарная ошибка системы с обратной связью равна

$$\bar{e}_n = \bar{e}_n^{(0)} + \bar{c}_0 e_n^{(1)} + \bar{c}e_n^{(2)}.$$

Если режим установившийся, то система автоматической подналадки полностью компенсирует любые ступенчатые смещения и погрешности начальной настройки.

При общей задаче синтеза системы автоматической подналадки в качестве критерия приемлемости системы была принята дисперсия суммарной ошибки системы обрабатываемой поверхности:

$$\sigma_e^2(n) = H \left\{ [e^{(0)}(n)]^2 \right\}.$$

Задача синтеза может быть представлена как задача минимизации $\sigma_e^2(n)$ при дополнительном условии равенства нулю ошибки от ступенчатого воздействия.

Это является задачей на условный экстремум. С помощью множителей Лагранжа λ она приводится к задаче безусловной минимизации функционала

$$J = \sigma_e^2(n) + \lambda e_n^{(1)}.$$

Рассмотренный подход к синтезу системы автоматической подналадки необходимо использовать в условиях, когда при нормальном ходе процесса доводки возникают ступенчатые изменения параметров настройки, обусловленные, например, сменой инструмента.

Выводы. В условиях серийного производства, характерного для оптического приборостроения, обеспечение стабильности и однородности продукции выходит на передний план. Одной из главных предпосылок достижения высокого качества оптических систем является автоматизация работ по изготовлению оптических деталей. Поэтому рассмотренная методика программного управления формообразованием высокоточных оптических поверхностей, в основу которой положена информация о форме оптической поверхности и реализация алгоритма автоматического управления съемом припуска, открывает большие возможности повышения качества оптических деталей, снижения их себестоимости, повышения производительности труда. Внедрение методики в практику производства высокоточных оптических

поверхностей позволит ускорить процесс создания оптических систем с повышенными характеристиками благодаря уверенному прогнозированию формы, качества и сроков изготовления деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология оптических деталей: Учебник для оптических специальностей технических вузов / Под ред. М.Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1978. – 415 с.
2. Законников В. П., Быков Б. З., Штандель С. К. Основы автоматизации производства оптических деталей. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.

Статья поступила в редакцию 19.06.03

Валерий Иванович Заварзин родился в 1956 г., окончил в 1980 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований”, декан факультета “Оптико-электронное приборостроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области оптического приборостроения.



V.I. Zavarzin (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. Ph. D. (Eng.), ass. professor of Optical-and-Electronic Devices for Research Application department, dean of Optical-and-Electronic Devices Engineering faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 publications in the field of optical devices engineering.

Валентин Иванович Алехнович родился в 1952 г., окончил в 1975 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1979 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области оптического приборостроения.

V.I. Alechnovich (b. 1952) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975 and the Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov in 1979. Ph.D. (Eng.), ass. professor of “Laser Optical-and-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 publications in the field of optical devices engineering.

Александр Иванович Гоев родился в 1947 г., окончил в 1970 г. Могилевский машиностроительный институт. Канд. техн. наук, генеральный директор ОАО “Красногорский завод имени С.А. Зверева”, зав. филиалом кафедры “Лазерные оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области оптического приборостроения.

A.I. Goev (b. 1947) graduated from the Mogilyov Institute for Mechanical Engineering in 1970. Ph.D. (Eng.), general director of the joint-stock company “Krasnogorsky zavod imeni s.a. Zvereva”, head of Laser Optical-and-Electronic Systems branch department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 publications in the field of optical devices engineering.

Алексей Алексеевич Ефремов родился в 1941 г., окончил в 1965 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные оптико-электронные системы”. Автор более 40 научных работ в области технологии оптического приборостроения.

V.I. Yefremov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. Ph.D. (Eng.), ass. professor of “Laser Optical-and-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 publications in the field of technology of optical devices engineering.