

05; 06  
© 1991 г.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИСТРИКЦИОННОГО ЭФФЕКТА ВИДЕМАНА ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СИСТЕМ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

*В. И. Аксинин, В. В. Аполлонов, С. В. Муравьев,  
А. М. Прохоров, С. А. Четкин*

Рассмотрен магнестрикционный актюатор пружинного типа, принцип действия которого основан на использовании эффекта Видемана. С использованием данного типа актюаторов создан корректор наклонов волнового фронта и линейный шаговый двигатель, дано описание принципа действия и конструкции этих устройств. Рассмотрена возможность использования магнестрикционных актюаторов для управления формой поверхности охлаждаемого адаптивного лазерного зеркала. Получены основные теоретические соотношения, позволяющие прогнозировать характеристики магнестрикционных актюаторов для использования в устройствах прецизионного позиционирования оптических элементов и в системах адаптивной оптики.

### Введение

Коррекция фазовых искажений интенсивных потоков когерентного излучения, осуществление контроля их направления в пространстве предполагают использование управляемых по положению в пространстве зеркал с изменяющимся в реальном масштабе времени рельефом отражающей поверхности. В настоящей работе рассматривается возможность создания таких оптических элементов на основе использования разработанных нами устройств прецизионных перемещений пружинного типа, реализующих магнестрикционный эффект Видемана [1, 2]. Данные устройства обладают уникальным сочетанием характеристик по развиваемым перемещениям; при их использовании открывается возможность создавать эффективные устройства активной оптики.

### Магнетомеханическое преобразование энергии при возбуждении крутильных деформаций ферромагнитного стержня

В работах [3, 4] рассмотрена модельная задача возбуждения крутильных деформаций в магнестрикционном ферромагнитном стержне, намагниченном суперпозицией аксиального и циркулярного магнитных полей. Однако вид использованного в работе [4] магнестрикционного тензора неадекватно отражает физическую картину процесса, поскольку при рассмотрении прямого эффекта Видемана предполагалось, что одна из намагниченностей является возбуждающей, тогда как другая выполняет параметрическую роль, обеспечивая поляризацию материала стержня. Такое рассмотрение находится в противоречии с физическим механизмом эффекта Видемана, предложенным и экспериментально обоснованным в работе [5]. В общем случае магнестрикционная энергия изотропного магнестрикционного ферромагнетика имеет вид

$$U = \lambda_1 u_{ii}^2 + \lambda_2 u_{ik} u_{ik} + b m_i m_k - H_i m_i + (1/2\chi) m_i m_i, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — константы Ламэ,  $b$  — магнестрикционная постоянная,  $\chi$  — магнитная восприимчивость,  $m_i$  — компонента намагниченности,  $u_{ik}$  — тензор деформации.

Уравнения магнитомеханического состояния упругого тела, минимизирующие функционал  $U$ , определяются из системы уравнений

$$\frac{\partial U}{\partial m_i} = 0, \quad \sum_k \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial U}{\partial u_{ik}} \right) - \frac{\partial U}{\partial u_i} = 0 \quad (2)$$

и выражаются в компонентах тензора деформаций и намагниченностей как

$$bm_k u_{ik} - H_i + \kappa m_i = 0, \quad 2 \frac{\partial}{\partial x_k} (\lambda_{,k} u_{,k}) + \frac{\partial}{\partial x} (bm_i m_k) = 0. \quad (3)$$

Таким образом, задача определения магнитомеханического состояния магнитоупругого ферромагнетика сводится к решению задачи связанной магнитоупругости. При решении этой задачи будем предполагать, что выполняются условия квазистационарности, т. е. пренебрежем величиной глубины скин-слоя в сравнении с поперечным размером образца. Также будем считать, что циркулярная намагниченность создается током, пропускаемым по стержню, и продольный размер стержня много больше поперечного.

Для решения задачи необходимо установить вид возбуждающей силы. В условиях нашей задачи эта сила представляется в виде градиента некоторой функции

$$\mathbf{F} = -\frac{1}{2} \nabla \left[ (\nabla \cdot \mathbf{A})^2 + \frac{4\pi}{c} \mu \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} \right], \quad (4)$$

где  $\mathbf{A}$  — векторный потенциал циркулярного магнитного поля,  $\mu$  — магнитная проницаемость.

В случае кругового сечения стержня циркулярная намагниченность представляется в виде

$$m = -\frac{\lambda}{\mu} \left( \frac{A}{y} \cdot y + \frac{A}{x} \cdot x \right) \frac{1}{r}, \quad (5)$$

а момент кручения имеет вид

$$M = -bm_x \frac{\chi}{\mu} \iint \left( -\frac{A}{y} y + \frac{A}{x} x \right) dx dy = bm_x \frac{3\pi}{c} j \frac{C}{G} \chi, \quad (6)$$

где  $C$  — крутильная жесткость,  $G$  — модуль сдвига.

Так как функция кручения [6] и компонента векторного потенциала удовлетворяют уравнениям одного и того же вида и однотипным граничным условиям, то угол кручения стержня выражается в следующем виде:

$$\theta = \frac{M}{C} = bm_x \frac{3\pi}{c} j \chi \frac{1}{G}.$$

Для получения решения в окончательном виде необходимо установить явное выражение для магнитной восприимчивости как функции угла кручения. Для этого используем систему магнитных уравнений (3), расписанную в компонентах циркулярной и аксиальной намагниченностей,

$$\frac{1}{\chi} m_\varphi + bm_z \theta_r - H_\varphi = 0, \quad \frac{1}{\chi} m_z + bm_\varphi \theta_r - H_z = 0, \quad (7)$$

в силу которых выражение для угла закручивания стержня кругового поперечного сечения в условиях эффекта Видемана имеет вид

$$\theta = \frac{3bI H_z (1 - 2\chi_0 H_\varphi \delta)}{Ca^2 G (1 - \chi_0 H_\varphi \delta)}, \quad (8)$$

где  $\delta = 3b^2I/caG$ ;  $I$  — величина тока, создающего циркулярную намагниченность;  $\chi$  — магнитная восприимчивость недеформированного стержня.

Естественно, что в условиях эффекта Видемана стержень должен не только закручиваться, но и изменять свои продольный и поперечный размеры. Рассмотрим деформации растяжения—сжатия в условиях нашей задачи. В общем виде уравнение упругости имеет вид

$$\frac{3(1-\sigma)}{1+\sigma} \text{grad div } \mathbf{U} - \frac{3(1-2\sigma)}{2(1+\sigma)} \text{rot rot } \mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{F} = \Delta G$ .

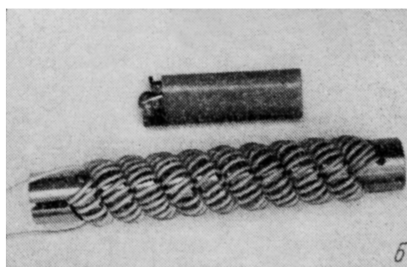
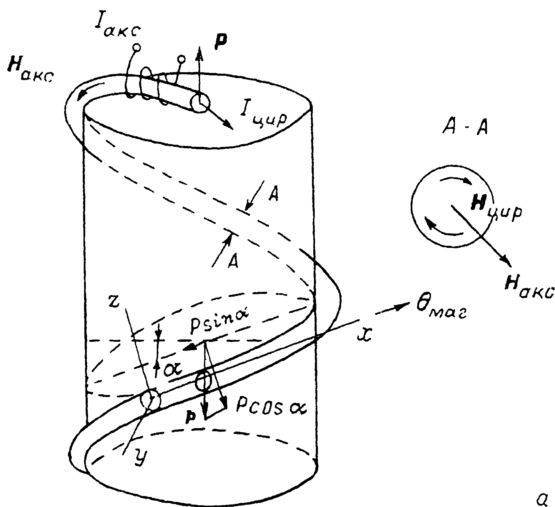


Рис. 1.

а — эскиз сил, моментов, магнитных полей, возникающих в витке МАПТ; б — характерный внешний вид магнестрикционного актюатора пружинного типа (МАПТ).

Поскольку для такого вида напряженного состояния кручение отсутствует, то  $\text{rot } \mathbf{U} = 0$ . В этом случае вектор деформации удовлетворяет уравнению  $\text{div } \mathbf{U} = G(1+\sigma)/(3-3\sigma)$ , где  $\sigma$  — коэффициент Пуассона. С учетом установленного вида возбуждающей кручение стержня градиентной силы продольная деформация определяется как

$$\frac{\Delta S}{S} = -\frac{\pi j}{2c\lambda_1} G(\chi + j\mu),$$

а поперечная как

$$U_{rr} = \sigma \frac{\Delta S}{S} + \frac{bm_z^2}{\lambda_1} (1 - \sigma),$$

где  $(\Delta S)/S$  — относительное изменение площади поперечного сечения стержня.

Таким образом, приведенные выражения полностью описывают деформационное состояние магнестрикционного стержня, намагниченного аксиаль-

ным и циркулярным магнитными полями. Принцип действия магнитоотрицательного актуатора пружинного типа (МАПТ) (рис. 1, а) основан на преобразовании крутильных деформаций, возбуждаемых в витке цилиндрической пружины, комбинацией циркулярного и аксиального магнитных полей в продольные деформации МАПТ. Причем поскольку знак деформации кручения стержня зависит от знака произведения аксиальной намагниченности и тока, создающего циркулярную намагниченность (согласно формуле (8)), то изменение направления одного из них будет приводить к изменению знака деформации МАПТ. Будем рассматривать механику работы МАПТ в приближении теории изгиба и кручения эквивалентного бруса, т. е. МАПТ рассматривается в виде винтовой линии, обладающей эквивалентной бусу, из которого она изготовлена, крутильной и изгибной жесткостью. Для винтовой линии, описываемой МАПТ и характеризуемой кручением  $\omega = \sin 2\alpha/D$  и кривизной  $\kappa = \cos^2 \alpha/D$ , изменение его длины и центрального угла выражается через изменение кривизны и кручения спирали МАПТ следующими зависимостями:

$$dH = \frac{\pi D^2 i}{2} (d\omega - \operatorname{tg} \alpha dx) + \sin \alpha dl,$$

$$d\Psi = 2\pi i \frac{dl}{l} + \pi i D (\operatorname{tg} \alpha d\omega + dx), \quad (10)$$

где  $H$  — высота МАПТ,  $D$  — его срединный диаметр,  $\Psi$  — центральный угол пружины МАПТ,  $i$  — число рабочих витков,  $l$  — длина развернутого стержня МАПТ,  $\alpha$  — угол подъема спирали МАПТ.

Поскольку рассмотрение производится для упругих деформаций, то изменение кривизны и кручения связано с приложенными (или развиваемыми МАПТ) моментами кручения  $dM_{xp}$  и изгиба  $dM_{zs}$  соотношениями Гука

$$d\omega = \frac{dM_{xp}}{C} = \frac{dM_{xp}}{GJ_{xp}}; \quad dx = \frac{dM_{zs}}{B} = \frac{dM_{zs}}{EJ_{zs}}, \quad (11)$$

где  $C$  и  $B$  — крутильная и изгибная жесткости сечения стержня МАПТ,  $E$  — модуль Юнга,  $J_{zs}$  и  $J_{xp}$  — моменты инерции сечения стержня для изгиба и кручения соответственно.

Тогда, объединяя выражения (10) и (11), получим соотношение для силы и перемещения, развиваемых МАПТ в условиях эффекта Видемана, в случае  $d\Psi = 0$  (жесткая заделка торца МАПТ)

$$dH = \frac{\pi P D^2 i}{4C \cos \alpha} \frac{1}{B \sin^2 \alpha / C + \cos^2 \alpha}. \quad (12)$$

Приведенные аналитические зависимости, характеризующие принцип действия МАПТ, тем не менее носят качественный характер и позволяют описать работу МАПТ в статическом режиме. Для установления количественных соотношений был изготовлен МАПТ в виде двухзаходной цилиндрической пружины диаметром 10 мм и высотой 100 мм (рис. 1, б). Аксиальная намагниченность в МАПТ создавалась током, пропускаемым по обмотке, навитой на витках спиралей МАПТ (плотность намотки 700 м<sup>-1</sup>), циркулярная — путем пропуска тока по витку спирали. В качестве материала МАПТ использовался пермендюр — сплав 49 % Fe, 49 % Co, 2 % V [8]. На рис. 2 приведена зависимость развиваемого МАПТ смещения от величины аксиального магнитного поля при контроле постоянного уровня поляризации спирали циркулярным магнитным полем. В соответствии с тем, что эффект Видемана нечетен,

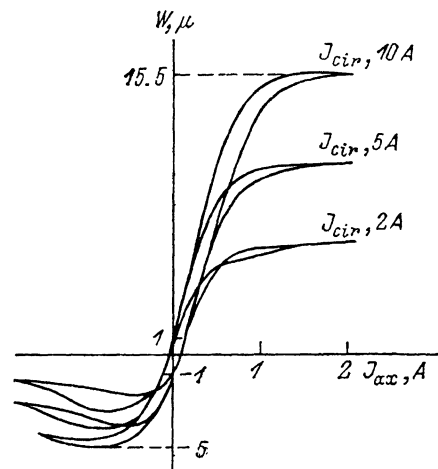


Рис. 2. Характерный вид зависимостей развиваемого МАПТ смещения от величин управляющего и поляризующего токов.

МАПТ развивает знакопеременные смещения. Петля гистерезиса несимметрична: при растяжении развиваются перемещения большей величины, чем при сжатии. Гистерезис магнитомеханического преобразования энергии является следствием гистерезиса перемагничивания материала МАПТ и для его устранения необходимо применять специальные меры. Динамика магнитомеханического преобразования энергии в МАПТ описывается амплитудно- и фазочастотными характеристиками (АЧХ и ФЧХ), т. е. зависимостями амплитуды установившегося механического колебания МАПТ и его задержки по фазе от частоты возбуждающего синусоидального сигнала. АЧХ и ФЧХ определены для случая постоянной величины амплитуды напряженности управляющего аксиального магнитного поля (рис. 3, а, б). МАПТ имеет резонанс на частоте 600 Гц, амплитуда колебаний МАПТ в резонансе достигает 150 мкм и отличается от нерезонансной амплитуды на низких частотах приблизительно в 3 раза. Таким образом, развиваемые МАПТ смещения под действием изменяющегося во времени управляющего электрического сигнала имеют отличную от управляющего сигнала форму, так как различные спектральные компоненты управляющего сигнала преобразуются МАПТ в соответствующие спектральные компоненты механического перемещения с различными для разных частот коэффициентами преобразования и фазовыми задержками. Приведенные

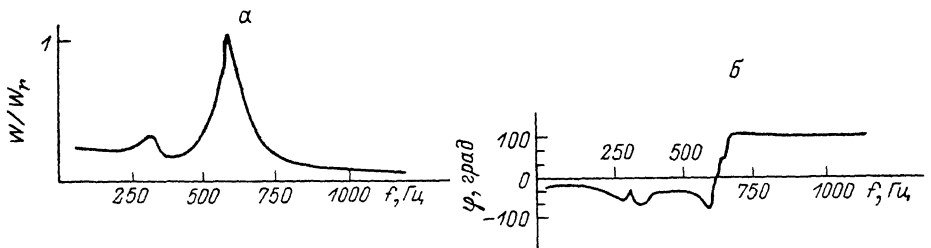


Рис. 3. Характерный вид АЧХ (а) и ФЧХ МАПТ (б).

в настоящем разделе результаты позволяют прогнозировать характеристики МАПТ, предназначенных для использования в устройствах прецизионного позиционирования.

### Двухкоординатное устройство динамического позиционирования отражающей поверхности в пространстве

Коррекция наклонов волнового фронта (ВФ) когерентного излучения, распространяющегося через оптическую систему, является традиционной проблемой оптики. Нами предлагается использовать для ее решения разработанный на основе использования МАПТ двухкоординатный электромеханический сканер (ЭМС), представляющий собой двухканальное исполнительное устройство (внешний вид которого и принцип действия иллюстрируется рис. 4, а, б), позволяющее управлять наклонами [7-11] волнового фронта отраженного от зеркальной поверхности излучения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поскольку передаточные характеристики МАПТ нелинейны и обладают гистерезисом, то использование принципа параметрического управления наклонами ВФ ЭМС не обеспечит высокой точности углового позиционирования. Для повышения точности в контур системы автоматического регулирования необходимо включить ЭСМ как исполнительный орган, при этом сигнал обратной связи в САР должен быть пропорционален выходной координате, что позволит учесть все ошибки, возникающие в ЭМС, за исключением ошибок датчика обратной связи. В зависимости от использования ЭМС изменяется и вид входного сигнала, относительно которого организуется обратная связь в САР. ЭМС может использоваться в двух различных режимах: первый — для управления положением луча в пространстве, в этом случае входными координатами САР ЭМС являются сигналы, задающие положение нормали плоской отражающей поверхности ЭМС в пространстве, а выходными — углы наклона нормали к оптической оси ЭМС; второй — система стабилизации по-

положения луча на мишени, компенсирующая его дрожания, вызванные вибрациями оптических узлов, турбулентностью среды, через которую распространяется принимаемый оптический сигнал. В этом случае входной координатой САР является положение точки фокусировки луча на мишени, а выходной — текущее положение изображения луча, при этом алгоритм регулирования

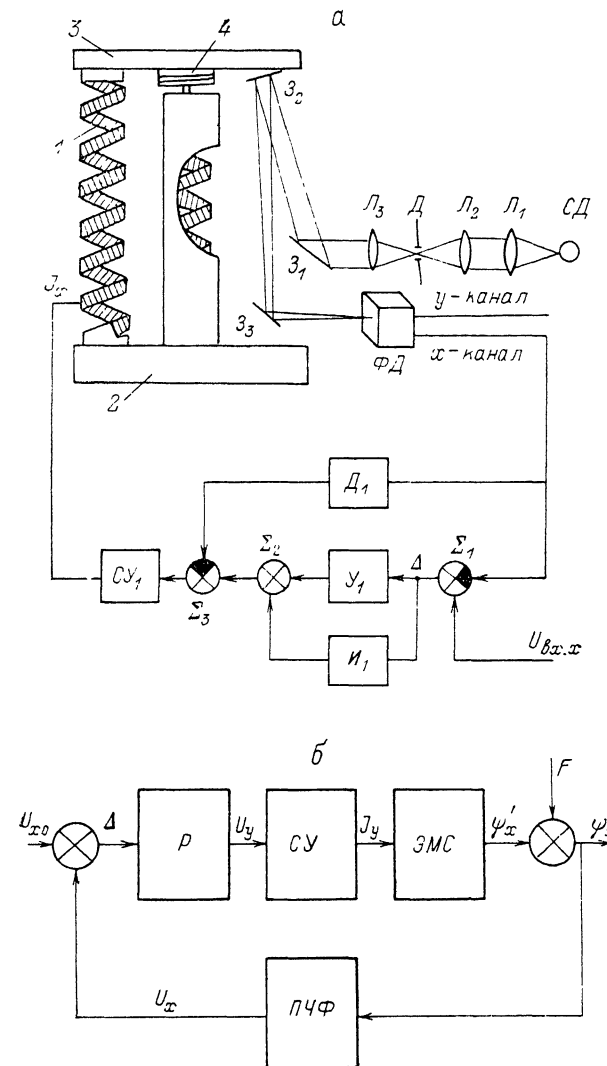
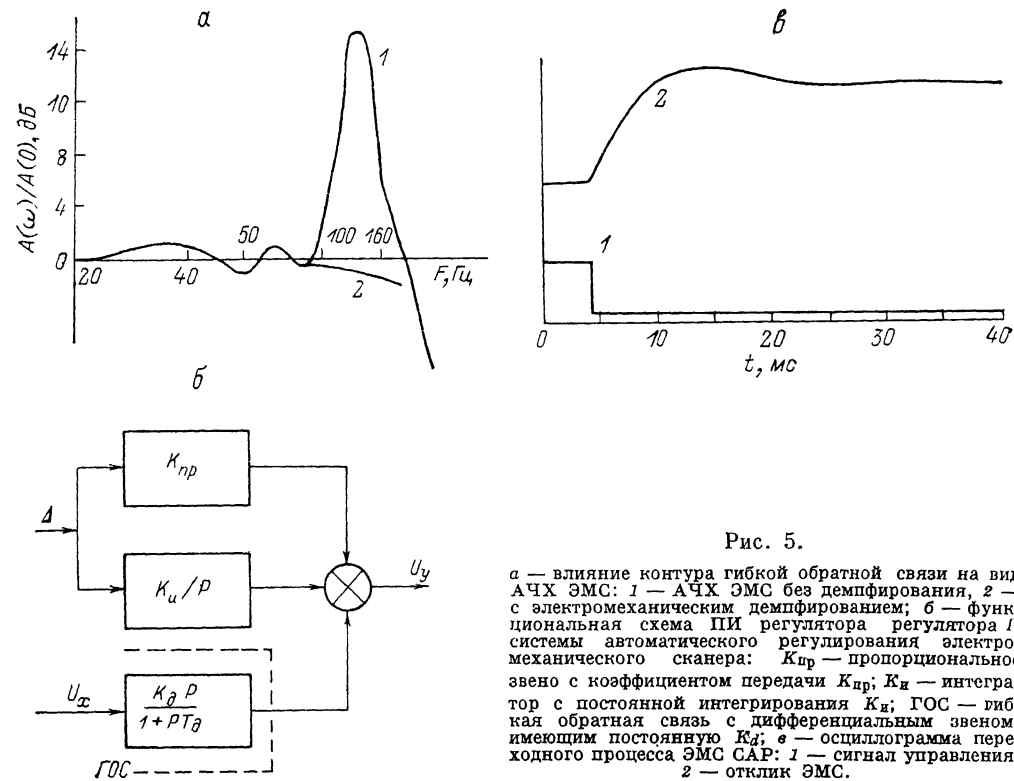


Рис. 4.

*а* — эскиз ЭМС, характеризующий его принцип действия: 1 — МАПТ; 2 — опорная плита; 3 — управляемое зеркало; 4 — упругий двухкоординатный шарнир; СД — светодиод;  $L_1, 2, 3$  — линзы;  $Z_1, 2, 3$  — поворотные зеркала; Д — диафрагма; ФД — позиционно-чувствительный фотодиод;  $\Sigma_1, 2, 3$  — сумматоры; СУ — сервоусилитель;  $D_1$  — дифференциальное звено; И<sub>1</sub> — интегратор; У — усилитель; *б* — функциональная схема системы управления ЭМС: Р — регулятор, СУ — сервоусилитель, ЭМС — электромеханический сканер, ПЧФ — позиционно-чувствительный фотоприемник,  $U_{\text{экс}}$  — сигнал установки системы,  $\Delta$  — сигнал ошибки,  $F$  — внешнее возмущение,  $\varphi_x$  и  $\varphi_x'$  — реальная и соответствующая сигналу управления координаты ЭМС.

состоит в минимизации разности входной и выходной координат. При этом в обоих случаях САР содержат одни и те же узлы, но различаются способом подачи сигнала обратной связи. Для управления ЭМС необходимо располагать информацией о текущем направлении нормали к отражающей поверхности. Для этого на основании ЭМС устанавливается позиционно-чувствительный фотодиод (ПЧФ), как показано на рис. 4, б. На поверхности ПЧФ с помощью проекционной системы  $L_1, L_2, D, L_3$  и зеркал  $Z_1$  и  $Z_2$  создается равномерное

световое пятно, отклонение центра которого относительно центра ПЧФ пропорционально углу наклона нормали отражающей поверхности к оси ЭМС. На выходе блоков усилителей БУ формируются сигналы  $u_x$ ,  $u_y$ , пропорциональные наклону поверхности ЭМС  $\alpha$  относительно его основания 2, на котором установлен ПЧФ. Эти сигналы содержат всю информацию о текущем состоянии ЭМС и используются в качестве сигналов обратной связи. Функциональная схема системы управления ЭМС приведена на рис. 4, б. Оба канала САР идентичны, поэтому работу САР рассмотрим на примере одного канала. Сигнал  $U_{x0}$ , задающий входную угловую координату ЭМС, сравнивается с сигналами



лом  $U_x$ , несущем информацию о текущей угловой координате нормали к отражающей поверхности, в результате чего формируется сигнал ошибки  $\Delta$ , который посредством регулятора Р и сервоусилителя СУ воздействует на МАПТ и вызывает движение отражающей поверхности ЭМС в направлении уменьшения ошибки. Однако реальная угловая координата нормали  $\varphi_x$  к поверхности ЭМС отличается от соответствующей сигналу управления на некоторую величину  $\theta$  из-за внешних возмущений (вибраций) и взаимного влияния каналов ЭМС. Так как ПЧФ измеряет угловое положение отражающей поверхности относительно основания ЭМС, т. е. непосредственно выходную координату ЭМС, то возмущение оказывается охваченным петлей обратной связи и учитывается при формировании сигнала ошибки. Динамические и точностные характеристики определяются передаточной функцией ЭМС (зависимостью угла наклона ЭМС от величины тока управления), которая имеет нелинейный гистерезисный характер, так как принцип действия исполнительного устройства ЭМС—МАПТ основан на эффекте магнетомеханического преобразования энергии [2]. Характер передаточной функции ЭМС таков, что на ней отсутствуют точки, где производная равна нулю, т. е. во всем диапазоне угловых положений поверхности ЭМС, она управляема. Однако наличие гистерезиса приводит к дополнительным фазовым задержкам в каналах САР, что ухудшает ее устойчивость. Кроме того, механическая система ЭМС является колебательным звеном с высокой добротностью (высота резонансного пика 20dB), поэтому

если не принимать специальных мер по демпфированию механического резонанса ЭМС, то для обеспечения его устойчивости работы ЭМС частота среза амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) должна быть на декаду ниже резонансной. Такой подход к созданию САР неприемлем, так как приводит к снижению быстродействия ЭМС. Кроме того, при обрезании АЧХ резонанс оказывается вне полосы пропускания САР, в результате чего внешние возмущения в области резонанса не будут демпфироваться. Для устранения этого

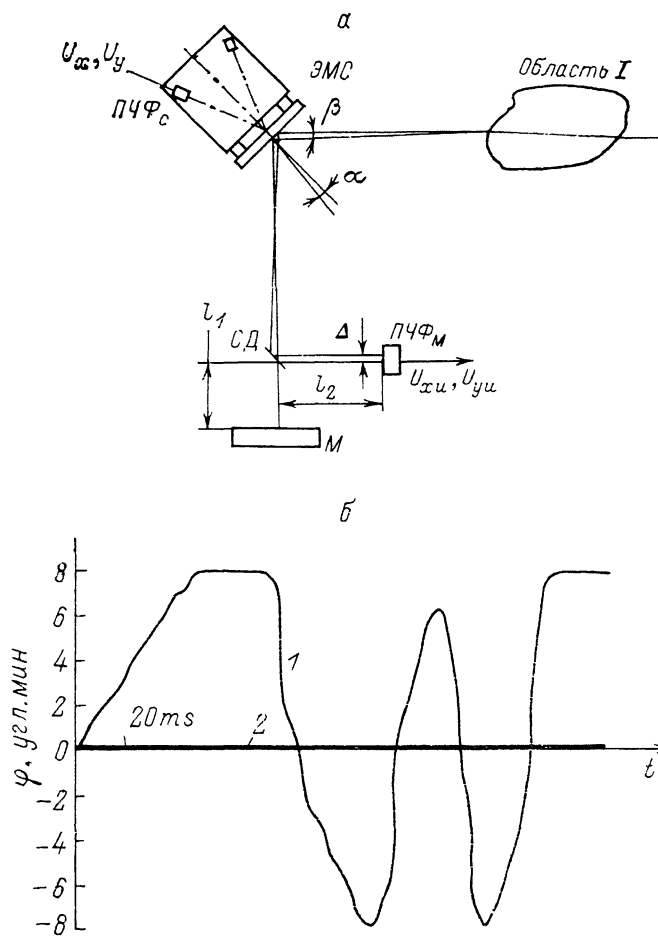


Рис. 6.

*a* — схема оптического тракта системы стабилизации изображения на мишени *М* на основе использования ЭМС: ПЧФМ и ПЧФС — позиционно-чувствительные фотоприемники, связанные с мишенью *М* и электро-механическим сканером ЭМС соответственно; СД — светоделитель; область *I* — область турбулентной среды;  $\beta$  — угол отклонения луча, прошедшего турбулентную среду;  $\alpha$  — угол наклона зеркальной поверхности ЭМС;  $\Delta$  — смещение изображения на ПЧФМ;  $l_1$  и  $l_2$  — оптические плечи; *b* — осциллограмма, иллюстрирующая работу одного канала ЭМС с разомкнутой (1) и замкнутой (2) петлей обратной связи.

целесообразно ввести контур гибкой обратной связи, охватывающий МАПТ и СУ. Применение демпфирования сводит колебательное звено к апериодическому второго порядка (рис. 5, *a*), что позволяет расширить полосу пропускания замкнутой САР вплоть до резонансной частоты МАПТ. В качестве регулятора *P* (рис. 4, *b*) необходимо использовать цепи с астатическим звеном (ПИ, ПИД регуляторы), устраняющие статическую ошибку регулирования. Структурная схема регулятора приведена на рис. 5, *b*, а осциллограмма переходного процесса ЭМС с САР описанного типа приведена на рис. 5, *в*.

В случае использования ЭМС для стабилизации положения оптического изображения оптический тракт системы необходимо модернизировать в соответствии с рис. 6, *a*. В этой схеме оптическое излучение, прошедшее через



турбулентную среду, падает на зеркало ЭМС с угловой ошибкой  $\beta$ , отразившись от него, падает на мишень М. Часть излучения с помощью светоделителя СД направляется на ПЧФ, механически связанный с М. Смещение положения изображения на светочувствительной площадке ПЧФ, вызванное угловой ошибкой  $\beta$ , приводит к появлению сигналов ошибки  $U_x$  и  $U_y$ . Наклоном зеркальной поверхности ЭМС с помощью МАПТ эта ошибка компенсируется. Если длины оптических путей  $l_1$  и  $l_2$  равны, то при  $\Delta = 0$  положение изображения на ПЧФ будет стабильным. Сигналы  $U_x$  и  $U_y$  содержат информацию об отклонениях  $\Delta$ , вызванных наклонами зеркала ЭМС на углы  $\alpha$  и случайными угловыми возмущениями  $\beta$ , поэтому использовать эти сигналы для демпфирования сканера нельзя. Цепь демпфирования и в этом случае строится на основе ПЧФ ЭМС, вырабатывающего сигналы  $U_x$  и  $U_y$ , пропорциональные углам наклона зеркала ЭМС относительно его основания. Регулятор для такой системы выполняется по схеме, приведенной на рис. 4, б, т. е. сигнал ошибки  $\Delta$  снимается с выхода ПЧФ, связанного с мишенью М, а сигнал для демпфирования ЭМС снимается с ПЧФ, установленного в ЭМС. Осциллограмма рис. 6, б демонстрирует компенсацию разработанным ЭМС случайных наклонов луча лазера, вызванных турбулентностью воздуха на трассе его распространения, в полосе частот до 50 Гц. Остаточная ошибка компенсации по одному каналу составила  $0.1''$ , тогда как при разомкнутой петле обратной связи диапазон углов наклона луча составлял  $8'$ . Таким образом, разработанное устройство является эффективным средством коррекции нестационарных угловых наклонов в прецизионных оптических системах.

### Прецизионный шаговый линейный двигатель на основе магнитострикционных актуаторов пружинного типа

На основе использования МАПТ представляется возможным создать прецизионный шаговый линейный двигатель (ШЛД), принцип действия которого описан в работе [2], а устройство иллюстрируется эскизом на рис. 7, а. В силу гистерезиса и нелинейности передаточных характеристик МАПТ организация системы управления ШЛД, обеспечивающей заданные точность позиционирования и быстродействие, требуют дополнительного рассмотрения. В настоящем разделе работы исследуются алгоритмы управления прецизионным ШЛД, позволяющие линеаризовать передаточные характеристики МАПТ, используемые в составе ШЛД, эффективно демпфировать его резонансные характеристики и за счет этого повысить устойчивость прецизионного динамического позиционирования при сохранении быстродействия ШЛД и его тяговых характеристик. Наиболее простым в реализации является следующий способ организации движения ШЛД: возбуждение МАПТ осуществляется токами, форма которых представлена на рис. 7, б. В этом случае можно увеличивать ток управления до уровня насыщения МАПТ, что позволяет получить максимальную величину шага и соответственно предельную скорость изменения выходной координаты ШЛД. Наиболее эффективно при этом возбуждение МАПТ на частоте его первого механического резонанса. Амплитуда колебаний электромагнитных фиксаторов (ЭФ), перемещающих стержень ШЛД, при этом достигает 150 мкм, а скорость движения стержня ШЛД может достигать 30 мм/с. Вследствие нелинейности передаточной характеристики МАПТ движение ЭФ в пределах шага неравномерно, что вызывает вибрации в ШЛД и проскальзывание ЭФ относительно перемещаемого стержня. Кроме того, конечная жесткость МАПТ приводит к изменению величины шага при изменении внешних механических нагрузок на ШЛД (например, в режимах разгона или торможения). В связи с этим в таком режиме управления невозможно обеспечить высокую точность установки выходной координаты ШЛД подсчетом числа шагов.

Для обеспечения точности позиционирования необходимо введение обратной связи по выходной координате ШЛД и контура управления величиной шага, что позволит одновременно управлять выходной координатой ШЛД и величиной его шага, т. е. скоростью изменения выходной координаты. Функциональная схема системы управления ШЛД приведена на рис. 8, а. В ней

циклограмму работы двигателя формирует цикловой автомат (ЦА), вырабатывающий 4 сигнала в соответствии с рис. 7, б, которые посредством соответствующих схем управления и сервоусилителей (СУ и СУЭФ) воздействуют на МАПТ и ЭФ. Управление ЦА осуществляется сигналами  $V$  и  $P$ . Сигнал управления  $P$  может принимать три значения (условно  $\pm 1$  и  $0$ ), которые соответствуют режимам «вперед», «назад» и «стоп». Сигнал управления скоростью  $V$  принимает значение от  $0$  до  $R_{\max}$  и определяет амплитуду токов управления МАПТ, т. е. величину шага ШЛД. Система управления работает следующим образом: входным сигналом системы является сигнал установки  $U_{x_0}$ , который на входном сумматоре сравнивается сигналом с датчика, контролирующего положение

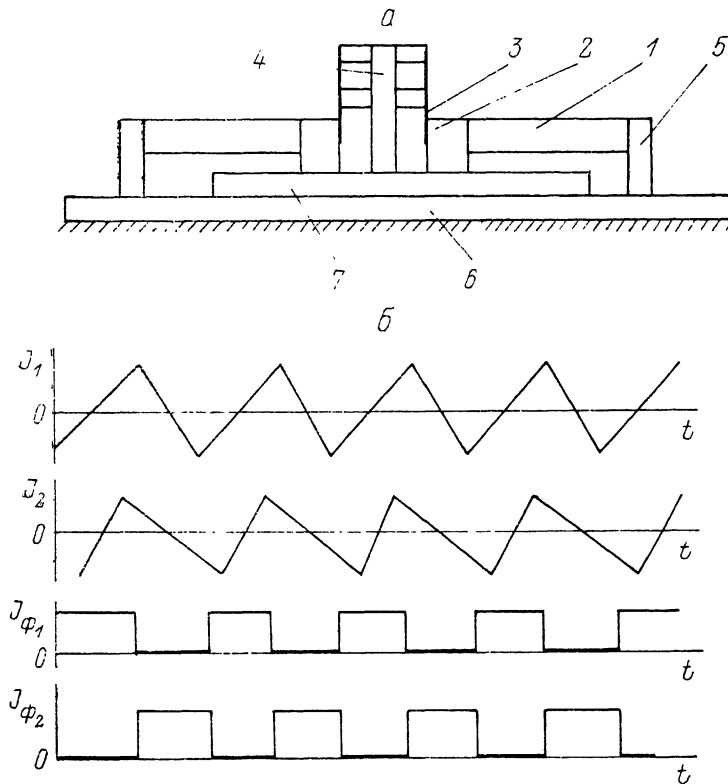


Рис. 7.

а — принципиальная схема ШЛД: 1 — МАПТ, 2 — электромагнитный фиксатор ЭФ, 3 — гибкий ортогональный шарнир, 4 — основание шарнира, 5 — основание МАПТ, 6 — основание ШЛД, 7 — перемещаемый стержень; б — циклограмма электрических сигналов, управляющих работой ШЛД:  $J_1, J_2$  — форма управляющих работой МАПТ электрических токов;  $J_{\Phi 1}, J_{\Phi 2}$  — форма управляющих ЭФ электрических токов.

перемещаемого двигателем объекта, полученный сигнал ошибки  $\Delta$ , пропорциональный отклонению текущего значения выходной координаты  $X$  от заданного сигнала  $U_{x_0}$ , подается на нелинейный элемент (НЭ). НЭ определяет знак сигнала  $\Delta$ , в соответствии с ним вырабатывает управляющий сигнал  $P$ , инициируя тем самым генерацию сигналов в ЦА, обеспечивающих движение ШЛД в направлении, соответствующем уменьшению текущего значения сигнала  $\Delta$ . Одновременно сигнал  $\Delta$  подается на регулятор  $P$ , вырабатывающий сигнал управления скоростью  $V$ , в общем случае пропорциональный модулю  $\Delta$ . По мере приближения текущего значения координаты  $X$  к координате останова ШЛД величина сигнала  $\Delta$  уменьшается, следовательно, уменьшается величина шага. В качестве НЭ необходимо использовать устройство с характеристикой, приведенной на рис. 8, б. В реальном ШЛД неточности в изготовлении и юстировке ЭФ будут приводить к возникновению возмущений по выходной координате в моменты включения—выключения тока в обмотках управления ЭФ, что будет проявляться как вибрации подвижных частей ШЛД. В результате

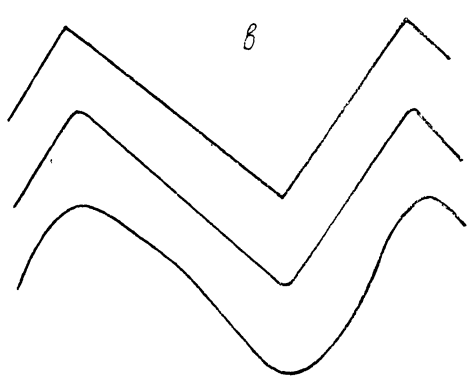
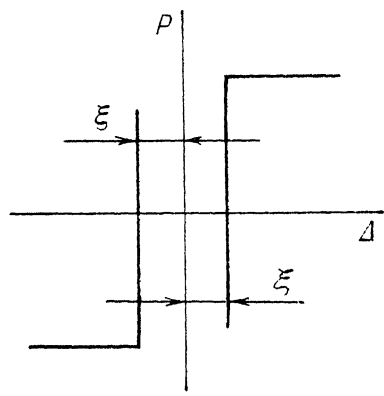
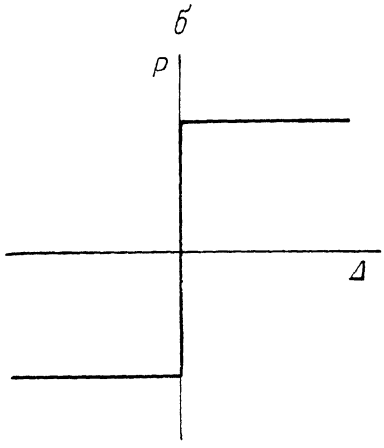
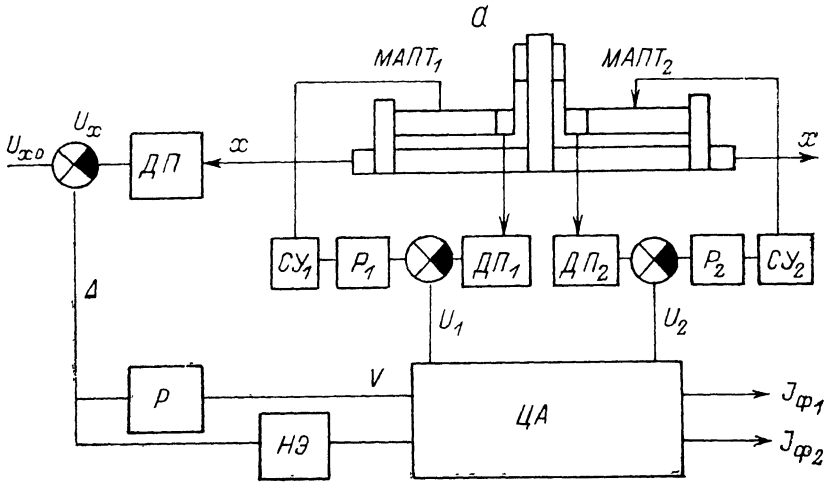


Рис. 8.

*a* — функциональная схема системы управления ШЛД с регулированием величины шага: ДП — датчик положения ШЛД, ДП<sub>1,2</sub> — датчики положения ЭФ1 и ЭФ2, ЦА — цикловой автомат, P — регулятор ШЛД, P<sub>1,2</sub> — регуляторы МАПТ, НЭ — нелинейный элемент, СУ<sub>1,2</sub> — сервоусилители соответствующих МАПТ, U<sub>х0</sub> — сигнал установки, X — выходная координата ШЛД, Δ — сигнал ошибки ШЛД, V — сигнал управления величиной шага; *б* — передаточная характеристика «идеального» и реального нелинейных элементов; *в* — осциллограммы работы МАПТ в ШЛД с системой управления координатами ЭФ: верхний луч — сигнал управления МАПТ с циклового автомата, средний луч — сигнал с датчика положения ЭФ при замкнутой петле локальной обратной связи, нижний луч — сигнал с датчика положения ЭФ при разомкнутой петле локальной обратной связи.

при использовании в качестве НЭ в системе управления ШЛД с приведенной идеальной релейной характеристикой будут возникать колебания системы возле точки установившегося режима, амплитуда и частота которых определяются динамикой подвижной системы ШЛД. Для устранения этих колебаний необходимо использовать НЭ, имеющий зону нечувствительности, величину которой будет задавать точность позиционирования ШЛД. Описанный режим управления ШЛД отличается тем, что выходная координата  $X$  связана с величиной ошибки  $\Delta$  через интеграл, т. е. система обладает астатизмом первого порядка, чем обеспечивается отсутствие статической ошибки слежения.

Для увеличения точности обработки выходной координаты ШЛД необходимо стабилизировать скорость движения ЭФ в пределах шага и уравнивать токи переключения ЭФ, что достигается путем введения локальных обратных

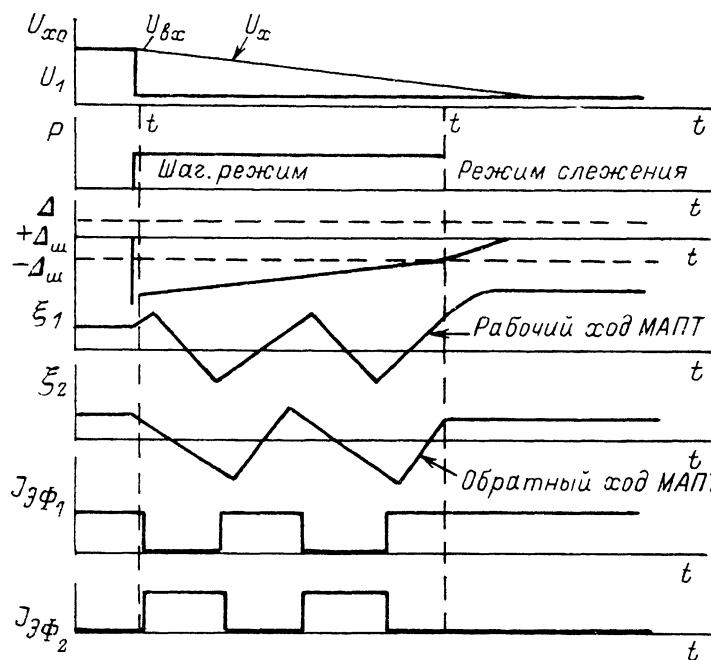


Рис. 9. Временные диаграммы работы системы управления ШЛД с регулированием в пределах шага.

$U_{x0}$  — входной сигнал установки ШЛД,  $U_x$  — сигнал датчика положения,  $P$  — сигнал установки режима ЦА,  $\Delta$  — сигнал ошибки,  $\xi_1, \xi_2$  — смещения ЭФ<sub>1</sub> и ЭФ<sub>2</sub>,  $I_{3\phi_1}$  и  $I_{3\phi_2}$  — токи обмоток управления ЭФ<sub>1</sub> и ЭФ<sub>2</sub>.

связей по перемещению ЭФ. Кроме того, введение обратных связей по положению ЭФ приведет к увеличению эквивалентной жесткости механической системы ШЛД, что снизит влияние внешних возмущений на движение ЭФ. Функциональная схема управления координатой ЭФ приведена на рис. 8, а. Датчик положения ДП регистрирует положение ЭФ<sub>1,2</sub> относительно неподвижного основания ШЛД. Затем производится сравнение сигналов с ДП с сигналами управления МАПТ и сигналы ошибок подаются на регуляторы  $P_{1,2}$ , управляющие работой сервоусилителей СУ<sub>1,2</sub> таким образом, чтобы сигнал ошибки уменьшался. Осциллограмма, демонстрирующая эффективность линеаризации передаточных характеристик МАПТ в составе ШЛД за счет введения описанной обратной связи, приведена на рис. 8, б. Таким образом, система управления движением ЭФ позволяет привести их в движение в соответствии с циклограммой, чем устраняются вибрации, связанные с непостоянством скоростей ЭФ в пределах шага ШЛД. Представляется возможным изменение алгоритма управления ШЛД таким образом, что управление его выходной координатой обеспечивается в пределах элементарного шага, за счет чего повышается точность обработки выходной координаты ШЛД до величины,

ограниченной точностью ДП и усилением СУ в петле обратной связи. Функциональная схема системы управления ШЛД для такого режима приведена на рис. 8, а и отличается от рассмотренной ранее тем, что в систему управления ШЛД вводится сигнал  $S$ , действующий на ЦА. ЦА при значениях сигнала  $P = \pm 1$  осуществляет элементарные шаги в направлении уменьшения величины  $\Delta$ . При достижении значения  $|\Delta|$ , равного величине элементарного шага ШЛД, сигнал  $P$  принимает значение  $P = 0$  и ЦА переходит в режим трансляции сигнала  $S$  на выходы  $U_1, U_2$ , что приводит к замыканию петли ОС через регулятор  $P$  на вход САР ЭФ, причем трансляция сигнала  $S$  осуществляется только на тот выход, который в момент перехода сигнала  $P$  к нулевому значению соответствовал циклу рабочего хода. На другой выход ЦА передает сигнал, соответствующий уровню сигнала на активном выходе в цикле обратного хода. В соответствии с текущим состоянием выходных сигналов  $U_1, U_2$  формируются и сигналы управления ЭФ. Такой алгоритм работы ЦА обусловлен необходимостью сопряжения выходных сигналов  $U_1, U_2$  по уровню в шаговом режиме и в режиме слежения (при  $P = 0$ ), что позволит избежать скачков координат ЭФ при смене режимов работы ЦА. Временные диаграммы работы ШЛД в этом режиме приведены на рис. 9, б. Таким образом, ШЛД является эффективным электромеханическим приводом для создания систем прецизионного позиционирования крупногабаритных оптических элементов. Например, на основе использования ШЛД представляется возможным создание систем ведения астрономических телескопов либо телескопических систем формирования широкоапертурных лазерных систем.

### Заключение

В настоящей работе проведено исследование возможности использования нового типа актуаторов, реализующих эффект Видемана и выполненных в виде цилиндрической пружины, в исполнительных устройствах адаптивной оптики.

Исследование разработанных устройств показало эффективность применения МАПТ при создании исполнительных устройств адаптивной оптики. В заключение авторы выражают благодарность В. И. Андриюшину, В. В. Останину, В. И. Бородину, А. С. Брыньскому, В. А. Чижевскому, А. В. Шемшурину за помощь при выполнении работы.

### Список литературы

- [1] Аполлонов В. В., Бородин В. И., Гончаренко И. В. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 48. № 8. С. 1639—1643.
- [2] Aksinin V. I., Apollonov V. V., Borodin V. I. et al. // Sensors and actuators. 1990. Vol. A. N 21. P. 236—242.
- [3] Бородин В. И., Останин В. В., Жаков С. В. // ФММ. 1983. Т. 56. № 5. С. 938—944.
- [4] Жаков С. В., Бородин В. И., Останин В. В. // ФММ. 1984. Т. 57. № 1. С. 45—51.
- [5] Pidgeon H. A. // Phys. Rev. 1919. Vol. 13. P. 209—237.
- [6] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. Теоретическая физика. Т. 7. М.: Наука, 1987.
- [7] Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение. 1981.
- [8] Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: ИЛ, 1956.
- [9] Apollonov V. V., Chetkin S. A., Prokhorov A. M., Temnov S. N. Experimentelle Technik der Physik. 1989. Vol. 37. N 1. P. 31—40.
- [10] Аполлонов В. В., Бородин В. И., Брыньских А. С., Зиенко С. И. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 2. С. 386—391.
- [11] Аполлонов В. В., Зиенко С. И., Муравьев С. В. и др. // ПТЭ. 1990. № 2.

Институт общей физики  
Москва

Поступило в Редакцию  
1 августа 1990 г.  
В окончательной редакции  
19 февраля 1991 г.