

УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ МАЯТНИКОВОГО ТИПА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

© 2007 г. Ю. М. Беляков*, канд. техн. наук; А. В. Лукин**, доктор техн. наук;
А. Н. Мельников**, канд. техн. наук

* Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань

** НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Рассматриваются состав и работа делительной машины маятникового типа и анализируется влияние внешних факторов на устойчивость ее функционирования. Приводится описание устройства контроля динамики резцовой каретки действующего макета делительной машины на базе интерферометра Физо. Обсуждаются результаты проведенных исследований.

Коды OCIS: 220.0220, 220.4000.

Поступила в редакцию 07.09.2006.

Известно, что на точность изготовления нарезных периодических рельефно-фазовых структур (дифракционных и измерительных решеток, линейных синтезированных голограмм, тест-объектов для силовой зондовой и электронной микроскопии, решетчатых поляризаторов и других подобных штриховых элементов) оказывают влияние следующие внешние факторы [1, 2]:

- изменение температуры в технологическом помещении;
- акустические вибрации;
- механические вибрации от внешних источников, на которые накладываются вибрации от собственных механизмов делительной машины;
- наличие частиц пыли, размер которых сопоставим с погрешностями изготовления микро- и наноструктур;
- электромагнитные помехи, воздействующие на электронную аппаратуру систем управления машинами.

Из представленных выше внешних факторов наиболее сложно минимизировать влияние изменения температуры и воздействие механических вибраций, особенно в условиях длительного процесса изготовления высокочастотных и крупногабаритных нарезных микро- и наноструктур [1–3].

Одно из возможных решений указанной проблемы лежит на пути существенного увеличения (в несколько раз) производительности самого технологического процесса формообразования нарезных структур, что значительно снизит влияние температурного и вибрационного факторов на точность изготовления данных структур.

Современные классические делительные машины типа Роуланда не позволяют пойти по этому пути технического совершенствования в силу заложенных в них принципов функционирования, основанных на использовании кинематики кривошипно-

ползунного механизма, сил трения скольжения и приводных устройств с вынужденными колебаниями, являющимися принципиально неустранимыми и постоянно действующими источниками “внутренних” вибраций самих делительных машин [1]. Нельзя не отметить, что попытки увеличения скорости движения резцовой каретки предпринимались австралийскими исследователями при создании экспериментального образца делительной машины типа Роуланда с приводом делительной каретки на основе использования пьезоэлектрического двигателя [4].

Новым техническим решением, позволяющим снизить влияние температурного и вибрационного факторов на точность изготовления нарезных структур, выступает предложенная делительная машина маятникового типа [5, 6]. Принципы ее построения открывают возможность увеличения производительности и точности изготовления нарезных структур за счет применения резцовой каретки, использующей динамические свойства физического маятника на опорах с трением упругости, ее привод представляет собой либо автоколебательный спусковой регулятор, либо приводное устройство “с нитью”.

Опишем состав и поясним кратко работу делительной машины маятникового типа, используя один из предложенных вариантов ее функциональной схемы [5] (рис. 1). Делительная машина маятникового типа содержит станину 1, делительную 2 и резцовую 3 каретки, приводы 4, 5 делительной 2 и резцовой 3 кареток (привод 4 делительной каретки 2 выполнен с возможностью электронного управления процессом перемещения), механизм 6 подъема и опускания алмазного резца, блок управления 7 приводами 4, 5 делительной 2 и резцовой 3 кареток и измерительную систему 8 линейного перемещения делительной каретки 2. Резцовая каретка 3 вы-

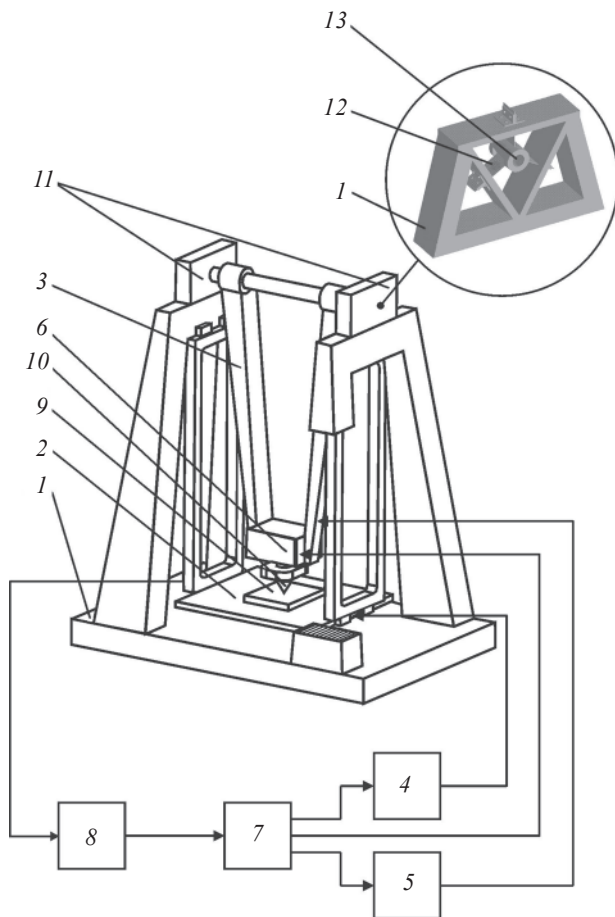


Рис. 1. Функциональная схема делительной машины маятникового типа: 1 – станина, 2 – делительная каретка, 3 – резцовая каретка, 4 – привод делительной каретки, 5 – привод резцовой каретки, 6 – механизм подъема и опускания алмазного резца, 7 – блок управления приводами делительной и резцовой кареток, 8 – измерительная система линейного перемещения делительной каретки, 9 – подложка нарезной периодической рельефно-фазовой структуры, 10 – алмазный резец, 11 – опоры с трением упругости, 12 – рабочие упругие пластины, 13 – вал резцовой каретки.

полнена в виде физического маятника, укрепленного на опорах с трением упругости 11, а привод 5 резцовой каретки 3 – в виде автоколебательного спускового регулятора. На делительной каретке 2 закреплена подложка нарезной периодической рельефно-фазовой структуры 9, на резцовой каретке 3 – алмазный резец 10. Вход измерительной системы 8 линейного перемещения делительной каретки 2 сопряжен с делительной кареткой 2. Выход измерительной системы 8 подключен на вход блока управления 7 приводами 4, 5 делительной 2 и резцовой 3 кареток. Первый выход блока управления 7 приводами 4, 5 делительной 2 и резцовой 3 кареток подключен на вход привода 4 делительной каретки 2, выход которого сопряжен с делительной кареткой

2. Второй выход блока управления 7 подключен на вход механизма 6 подъема и опускания алмазного резца. Третий выход блока управления 7 подключен на вход привода 5 резцовой каретки 3, выход которого сопряжен с резцовой кареткой 3. Цикл работы делительной машины маятникового типа аналогичен циклу работы классической делительной машины, в состав которой входит привод делительной каретки, построенный, например, на основе использования пьезоэлектрического элемента, реализующий дискретное (“старт-стопное”) поступательное микроперемещение подложки нарезной структуры [4], за исключением того, что в основе работы предложенной резцовой каретки лежит использование динамических свойств физического маятника на упругих пружинных подвесах. Штрих формируется в тонкой металлической пленке на подложке 9 с помощью алмазного резца 10 при фиксированном положении делительной каретки 2. На рис. 1 приведен один из возможных вариантов исполнения опоры с трением упругости 11 в виде трехленточного пружинного шарнира, у которого три рабочие упругие пружинные пластины 12 конструктивно располагаются под углом 120° и крепятся через переходную втулку к валу 13 резцовой каретки 3.

Для проверки принципиальной работоспособности и проведения экспериментального исследования делительной машины маятникового типа был разработан и изготовлен ее действующий макет, конструкция которого выполнена в соответствии с рис. 1. Наряду с другими видами натуральных экспериментов [6] выявлялось влияние “внешних” вибраций на устойчивость функционирования макета делительной машины предложенного типа. Именно этот аспект более полно раскрывается в настоящей статье.

Рассмотрим конструкцию макета. К основным стойкам конструкции макета крепится резцовая каретка высотой ≈ 1 м, выполненная в виде физического маятника на двух опорах с трением упругости, которые позволяют ей совершать гармонические колебания в пределах угла в 2° . В качестве каркаса и оси резцовой каретки использованы стержни диаметром 22 мм из инвара 32НҚД, что позволяет существенно снизить влияние изменения температуры в технологическом помещении. Опоры с трением упругости представляют собой трехленточные пружинные шарниры, в которых упругие элементы выполнены из пружинной стали 65Г.

К станине также крепится делительная каретка, которая представляет собой “обращенный” пружинный параллелограмм с жесткими накладками. “Ползун” – подвижная часть такого пружинного параллелограмма – находится ниже неподвижного осно-

вания, так что его кинематическая схема является обращенной. Ползун является столиком делительной каретки. Упругие элементы в конструкции делительной каретки выполнены из пружинной стали 65Г, жесткие накладки – на основе стержней диаметром 22 мм из инвара марки 32НЖД. Высота упругих направляющих делительной каретки равна 1,01 м.

Привод делительной каретки построен на основе использования пьезоэлектрического элемента типа ППУ-5 с возможностью электронного управления. Измерительная система линейного перемещения делительной каретки представляет собой прецизионный индукционный датчик линейных перемещений с электронным блоком обработки “Микрон-02”. Дискретности измерения: в диапазоне ± 2000 мкм – 1 мкм, в диапазоне ± 200 мкм – 0,1 мкм, в диапазоне ± 20 мкм – 0,01 мкм.

Макетирование привода резцовой каретки проводилось в двух вариантах:

в виде электронно-механического спускового регулятора с магнитоэлектрическим приводом, который обеспечивает поворот с угловой амплитудой до 1° и периодом автоколебаний $T_p \approx 1$ с; конструкция регулятора данного типа рассчитана по известным методикам [7]. Закрепленная на резцовой каретке роторная часть привода состоит из двух магнитопроводов с постоянными магнитами, статорная часть установлена на станине макета и состоит из катушки индуктивности, электронная часть привода построена на основе использования транзистора. Экспериментально получено, что баланс работ в данной системе наступает уже при напряжении питания постоянного тока $U_p = 1$ В, при этом устанавливаются устойчивые автоколебания резцовой каретки, максимальная угловая амплитуда которых достигается при $U_p = 4$ В;

в виде привода “с нитью” на основе электромагнита (напряжение питания постоянного тока $U_{\text{пит}} = 8$ В подобрано экспериментально). Электромагнит втяжной конструкции жестко укреплен на отдельной стойке, подвижный элемент – якорь электромагнита – соединен с резцовой кареткой мало растяжимой нитью; при подаче напряжения на электромагнит резцовая каретка удерживается в крайнем положении, при снятии напряжения питания с электромагнита резцовая каретка освобождается и совершает рабочий ход (колебание); в конце обратного хода электромагнит “захватывает” и фиксирует резцовую каретку до начала следующего цикла нарезки.

На резцовой каретке закреплена резцовая головка с механизмом подъема и опускания алмазного резца. Механизм подъема и опускания резца используется типовой и представляет собой управляемый

электромагнит с напряжением питания постоянно-го тока 27 В.

В качестве блока управления приводами делительной и резцовой кареток используется персональный компьютер типа IBM PC Pentium IV.

Экспериментальное исследование действующего макета делительной машины маятникового типа проводилось в заглубленной лаборатории дифракционных решеток Государственного института прикладной оптики, в специальной вибро- и термоизолированной технологической кабине, где поддерживается постоянная температура с допуском $\pm(0,05-0,1)^\circ\text{C}$ и предусмотрено экранирование от внешних источников электромагнитного излучения.

Одним из “прямых” методов экспериментального исследования работы резцовой каретки и влияния на нее вибраций фундамента является известный прецизионный метод исследования по интерференционной картине [8]. Изменение интерференционной картины отражает направление и величину перемещения резцовой каретки по нефункциональным координатам. Точность метода характеризуется десятками долями длины волны используемого источника лазерного излучения.

В основу устройства контроля динамики резцовой каретки макета и влияния “внешних” вибраций положена известная схема интерферометра Физо [8]. Принципиальная оптическая схема устройства контроля показана на рис. 2. Источником излучения *1* является гелий-неоновый лазер модели ГН-15-1 (длина волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм, мощность излучения $P = 15$ мВт). Коллиматор *2* имеет световой диаметр $D_k = 40$ мм, увеличение $\Gamma_k = 20\times$. Зеркало *5* жестко закреплено на резцовой каретке *6* (на рис. 2 показан фрагмент резцовой каретки *6*). Зеркало *5* имеет световую апертуру 40×50 мм, отражающий слой – алюминиевый. В качестве сопрягающего объектива *7* используется объектив “Индустар-51” с фокусным расстоянием $F = 210$ мм и относительным отверстием 1:4,5. “Точечная” диафрагма *8* необходима для устранения паразитных засветок и установлена в фокальной плоскости объектива *7* (диаметр диафрагмы ≈ 1 мм). Цифровой фотоаппарат *9* применен для фиксации интерференционной картины (модель цифрового фотоаппарата – MINOLTA DiMAGE 7i, фокусное расстояние объектива фотоаппарата $F_1 = 50$ мм, режимы работы фотоаппарата: разрешение 1280 пикселей, выдержка $1/2000$ с, диафрагменное число 2,8, чувствительность 800 единиц, частота кадров 7 кадр/с). Элементы *1-4*, *7-9* жестко крепятся на станине макета.

Для обеспечения условия равенства интенсивностей опорного и объектного пучков и повышения контраста интерференционной картины используется светоделительная полупрозрачная пластинка *3*,

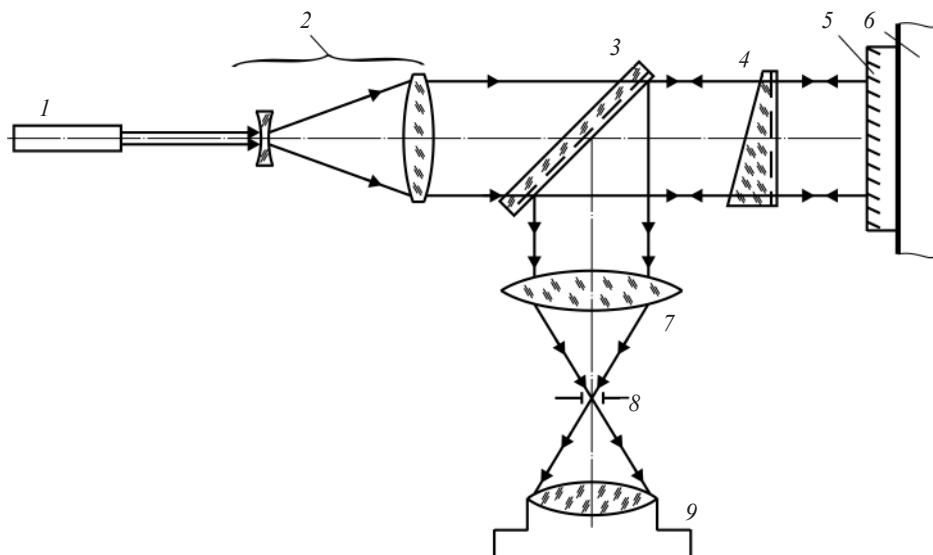


Рис. 2. Оптическая схема устройства контроля динамики резцовой каретки: 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – светоделительная полупрозрачная пластинка, 4 – измерительная полупрозрачная пластинка, 5 – подвижное зеркало, жестко связанное с резцовой кареткой; 6 – резцовая каретка, 7 – сопрягающий объектив, 8 – “точечная” диафрагма, 9 – цифровой фотоаппарат.

имеющая диэлектрическое покрытие с коэффициентом пропускания $\tau \approx 60\%$ и коэффициентом отражения $\rho \approx 40\%$. Измерительная полупрозрачная пластинка 4 изготовлена в форме клина с углом $\theta_{н.п} = 30'$ для устранения мешающего действия блика, отраженного от ее “нерабочей” поверхности.

Работа устройства контроля заключается в следующем. Пучок источника лазерного излучения 1 расширяется с помощью коллиматора 2, проходит через светоделительную пластинку 3 и попадает на измерительную пластинку 4, которая разделяет пучок на опорный (отражается от светоделительного слоя пластинки 4) и объектный (проходит через пластинку 4 и падает на зеркало 5, жестко закрепленное на резцовой каретке 6). Отраженный от зеркала 5 объектный пучок проходит через пластинку 4 и интерферирует с опорным пучком. Интерференционная картина фиксируется цифровым фотоаппаратом 9 с частотой 7 кадр/с.

Юстировка устройства контроля и получение исходной интерференционной картины осуществляются угловыми подвижками оптических элементов 3 и 4 при неподвижной резцовой каретке 6. Поскольку зеркало 5 закреплено на резцовой каретке 6 и перемещается (поворачивается) вместе с ней, то воздушный зазор между зеркалом 5 и пластинкой 4 изменяется, при этом изменяется исходная интерференционная картина (изменяется частота и ориентация полос). С помощью устройства контроля можно фиксировать повороты резцовой каретки по ее нефункциональным угловым координатам θ_1 и ψ_1 при повороте по основной несущей угловой координате ϕ_1 . Интерференционная картина настро-

ена на конечные полосы для лучшего наблюдения направления перемещений полос.

На рис. 3 приведены образцы интерферограмм, полученные с помощью устройства контроля. Они характеризуют качество первоначальной настройки самого устройства контроля (рис. 3а) и динамику резцовой каретки макета за полный цикл ее колебания (рис. 3б–3ж).

С использованием устройства контроля проведены следующие экспериментальные исследования динамики резцовой каретки макета:

1. При выключенном приводе резцовая каретка была свободно подвешена на опорах с трением упругости. Интерференционная картина перемещалась случайным образом в пределах порядка 0,5 интерференционной полосы за счет вибраций, проникавших на резцовую каретку со стороны фундамента.

2. Резцовая каретка приводилась в движение автоколебательным спусковым регулятором. Механизм подъема и опускания алмазного резца не включался, формообразование штрихов не выполнялось. Полосы интерференционной картины разворачивались, изменялся их период. К вибрациям случайного характера, проникавшим со стороны фундамента, добавились колебания резцовой каретки по ее нефункциональным координатам θ_1 и ψ_1 . Максимальное значение поворота по координате θ_1 составило $5,4''$, по координате $\psi_1 - 56,9''$. Обработка интерферограмм выполнялась по известным методам [8].

3. Резцовая каретка приводилась в движение автоколебательным спусковым регулятором. Был

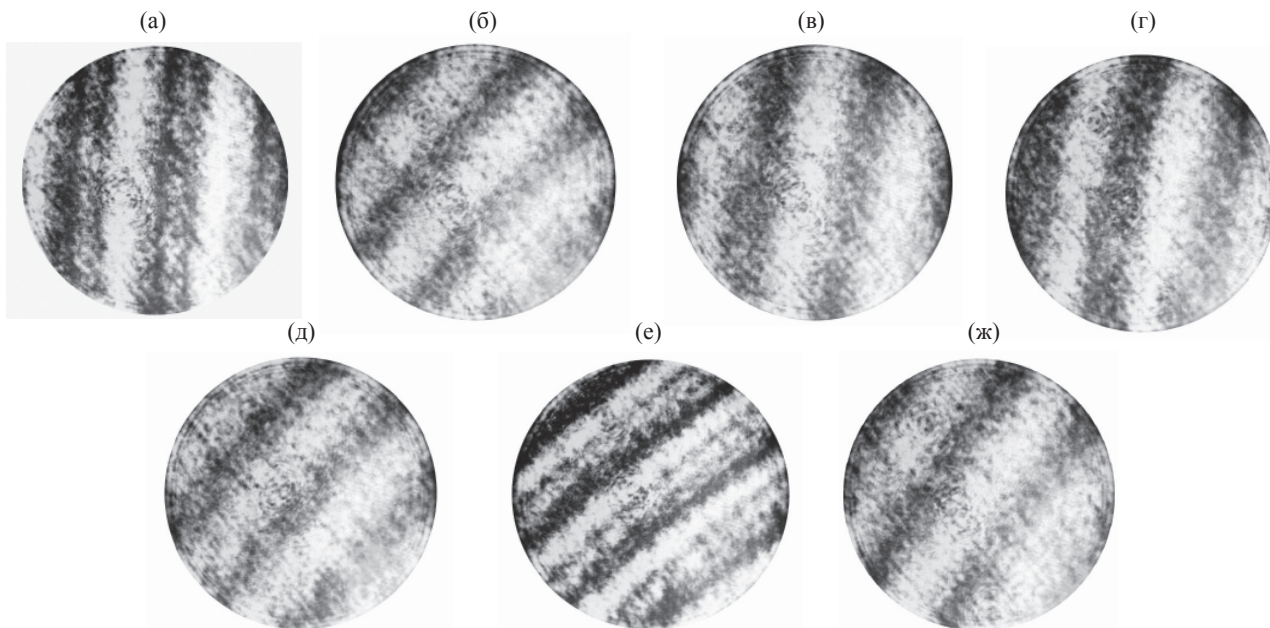


Рис. 3. Интерферограммы динамики резцовой каретки, полученные с помощью устройства контроля. а – интерферограмма, характеризующая качество первоначальной настройки устройства контроля при неподвижной резцовой каретке; б–ж – интерферограммы одного полного цикла перемещения (периода колебания) резцовой каретки.

включен механизм подъема и опускания алмазного резца, выполнялось формообразование штрихов. Характер изменения интерференционной картины был аналогичен результату, полученному в п. 2.

4. Резцовая каретка приводилась в движение приводом “с нитью”. Механизм подъема и опускания алмазного резца не включался, формообразование штрихов не выполнялось. Характер изменения интерференционной картины был аналогичен результату, полученному в п. 2.

5. Резцовая каретка приводилась в движение приводом “с нитью”. Был включен механизм подъема и опускания алмазного резца, выполнялось формообразование штрихов. Характер изменения интерференционной картины был аналогичен результату, полученному в п. 2.

Полученные результаты выявили два обстоятельства. Первое – макет расположен в так называемом “межкабинном” технологическом пространстве, виброизоляция фундамента которого оказалась все еще недостаточной для заданных целей. Поэтому проникшие на резцовую каретку “внешние” вибрации имеют амплитуду порядка 0,08 мкм со случайной частотой в диапазоне 3–5 Гц, что близко к частоте автоколебаний резцовой каретки. Следовательно, при дальнейших исследованиях макет требуется установить на фундаменте с лучшей виброизоляцией и более низкой частотой среза, т. е. макет необходимо поместить в так называемую “внутреннюю” технологическую кабину. Второе – эксперименты

показали, что динамика резцовой каретки макета характеризуется пространственной воспроизводимостью в пределах допуска [6]. В то же время наблюдается отклонение от прямолинейности ее траектории движения. Это объясняется тем, что конструкция макета обладает некоторой материальной асимметрией в части опор с трением упругости и каркаса резцовой каретки. Поэтому при создании экспериментального образца делительной машины маятникового типа необходимо предусмотреть повышенные требования к идентичности конструкции упругих пружинных подвесов резцовой каретки и их коэффициентов жесткости и демпфирования, к точности изготовления деталей и сборки резцовой каретки.

Снижение влияния изменения температуры в технологическом помещении в процессе изготовления нарезных структур с помощью делительной машины маятникового типа можно достичь за счет:

- повышенного быстродействия работы резцовой каретки в режиме автоколебаний с периодом $T_p = 1$ с, что было показано при численном моделировании [6] и подтверждено на действующем макете (таким образом можно получить общее время нарезки в 5–10 раз меньше, чем у классических аналогов);

- использования специальных материалов с минимальными значениями температурного коэффициента линейного расширения, например, суперинвара, плавленого кварца, ситалла;

– применения термокомпенсационных устройств на основе подбора определенных пар материалов, что особенно необходимо при наличии вертикального градиента температур.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что влияние основных внешних факторов – изменения температуры в технологическом помещении и механических вибраций – поддается минимизации, что обеспечивает возможность создания условий для устойчивого функционирования делительной машины маятникового типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов Ф.М., Яковлев Э.А. Дифракционные решетки // Современные тенденции в технике спектроскопии. Новосибирск: Наука, 1982. С. 24–94.
2. Hutley M.C. Diffraction gratings. London. New York. Paris: Academic Press, 1982. 336 p.
3. Федотов А.И. Технология автоматизированного нанесения штрихов и знаков. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1977. 304 с.
4. Bartlett I.R., Wildy P.C. Diffraction grating ruling engine with piezoelectric drive // Appl. Opt. 1975. V. 14. № 1. P. 1–3.
5. Лукин А.В., Мельников А.Н. Делительная машина для изготовления периодических штриховых структур, преимущественно дифракционных решеток (варианты) // Патент России № 2130374. 1999.
6. Мельников А.Н., Мирумянц С.О., Лукин А.В. Делительная машина маятникового типа для изготовления нарезных периодических рельефно-фазовых структур // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 44–49.
7. Шполянский В.А., Курницкий А.М. Спусковые регуляторы приборов времени. М.: Матгиз, 1963. 464 с.
8. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. 296 с.