

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

## Предварительно программируемая фокусировка микрообъектива углоизмерительной установки

© 2021 г. **В. П. Кирьянов\***, ДОКТОР ТЕХН. НАУК;  
**А. В. Бобков\*\***, КАНД. ТЕХН. НАУК; **Н. А. Гурин\***, \*\*\*;  
**А. А. Зотов\***; **А. Г. Каракоцкий\***; **А. В. Кирьянов\***, КАНД. ТЕХН. НАУК

\*Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

\*\*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

\*\*\*Новосибирский приборостроительный завод, Новосибирск

E-mail: alexey@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 21.01.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-05-76-81

В измерительных установках, используемых для контроля метрологических характеристик прецизионных оптических углоизмерительных структур (круговых шкал, растров и многогранных кодовых дисков), применение традиционных методов автоматической фокусировки микрообъективов, входящих в состав их считывающих головок, наталкивается на заметные осложнения. В таких установках предложено использовать принцип предварительно программируемой фокусировки (префокусировки) микрообъектива. Рассмотрена функциональная схема подсистемы префокусировки круговой измерительно-диагностической установки модели АЭ.1686 на базе линейного позиционирующего столика Nano-OP65M. Приведены экспериментальные результаты, полученные в ходе опытной эксплуатации установки с подобной подсистемой.

**Ключевые слова:** автофокусировка, углоизмерительная структура, топология элемента, угловая погрешность, круговая измерительно-диагностическая установка.

**Коды OCIS:** 230.4000, 230.0250, 230.0040, 120.5475

### ВВЕДЕНИЕ

Применение в считывающей головке круговой измерительно-диагностической установки (КИДУ) модели АЭ.1686 [1–3] светосильного  $50\times$  микрообъектива Nikon MUE 10500 позволило реализовать устойчивое формирование управляющих сигналов в соответствии с требованиями технического задания (ТЗ) на разработку системы. Однако неплоскостность реальных рабочих поверхностей фотошаблонов или рабочих образцов контролируемых углоизмерительных структур (УИС) на практике часто выходит за пределы  $\pm 3$  мкм, заложенных в ТЗ на разработку данной углоизмерительной машины (УИМ).

Это обстоятельство приводит к повышенному разбросу результатов измерений, полученных с помощью данного устройства. А при превышении показателей неровности выше  $\pm(8-10)$  мкм УИМ выдает неверные результаты. Чтобы расширить диапазон устойчивой работы установки, было предложено использовать режим измерений с предварительно программируемой фокусировкой микрообъектива.

В статье на примере модернизированной считывающей головки КИДУ модели АЭ.1686 показана перспективность использования режима измерений с предварительно программируемой фокусировкой микрообъектива.

## РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Диапазон устойчивой работы лазерных генераторов изображений и другого технологического оборудования для синтеза элементов фотоники существенно расширяется при использовании режима автоматической фокусировки (АФ) микрообъективов записывающих головок, входящих в состав подобных устройств [4]. Однако в случае УИМ, используемых для контроля фотшаблонов и рабочих образцов УИС, техническое воплощение концепции АФ наталкивается на ряд принципиальных затруднений. Например, реализация схем АФ на основе вспомогательного зондирующего излучения, широко применяемого в лазерных генераторах изображений [5–7], в случае УИМ затруднена (а практически и невозможна) из-за резких изменений амплитуды отраженных сигналов. Это связано с прохождением перед микрообъективом либо сильно отражающих участков топологии (металлизируемого покрытия), либо полностью прозрачных участков. В то время как сам принцип работы подобных систем АФ основан на выявлении очень малых изменений в амплитудах отраженных сигналов, обусловленных паразитными уходами микрообъектива от положения точной фокусировки излучения, проходящего через него и направляемого на однородную отражающую поверхность.

Безусловно, в подобных случаях для создания систем АФ более пригодна другая концепция их реализации, основанная на достижении экстремума в контрасте освещаемой топологии. Более того, она широко используется в современных цифровых фотоаппаратах и видеокамерах. Однако в этих применениях допускается сравнительно невысокая скорость смены анализируемых сцен, в то время как в случае УИМ (даже для простейших структур типа радиальных растров) частота смены сцен достигает десятков кГц. Формирование контрастных изображений с подобными скоростями изменения сцен требует специализированных фотоматриц с индивидуальным считыванием сигналов с каждого элемента матрицы.

Для достижения устойчивой работы считывающей головки УИМ при отсутствии подобных изделий была использована процедура, основанная на предварительно программиру-

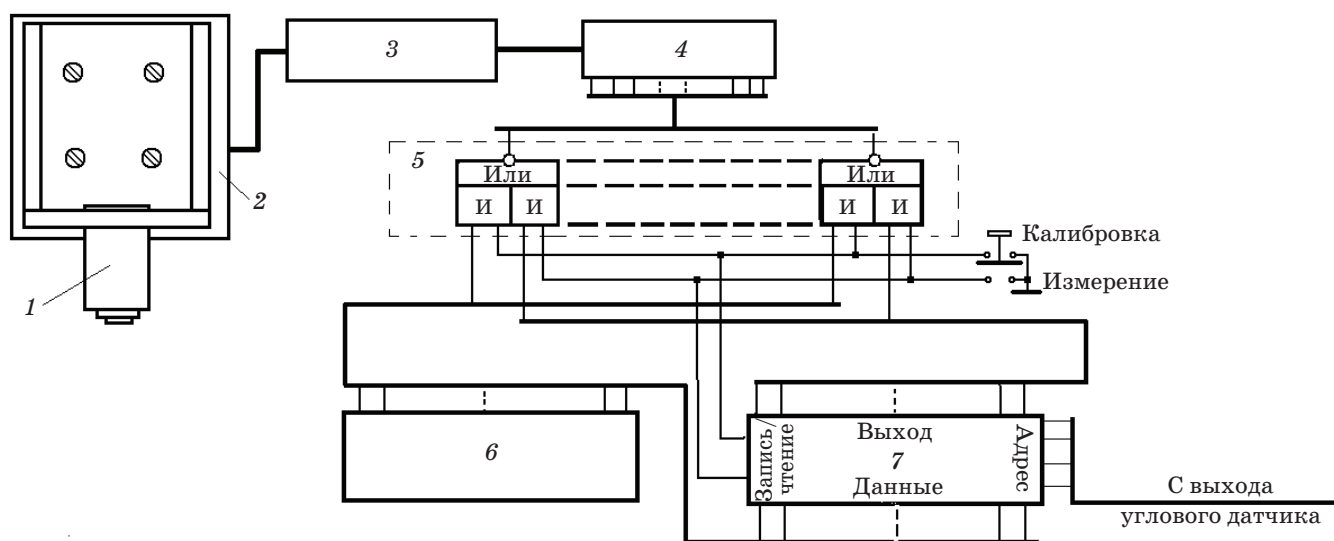
емой фокусировке микрообъектива. В этом случае контролируемая структура сканируется по предварительно избранной траектории с остановками в выбранных точках, в которых уточняются условия фокусировки микрообъектива. Параметры управления фокусировкой микрообъектива в этих выбранных точках траектории сканирования запоминаются в блоке оперативной памяти подсистемы фокусировки с целью последующего использования их в ходе измерительного процесса.

В подобной системе измерение угловых параметров топологии контролируемой УИС начинается с автоматического выхода считывающей головки УИМ на выбранную ранее траекторию сканирования и автоматической установки микрообъектива по координате  $Z$  в соответствии с параметрами сигнала управления для этой точки, считываемого из блока оперативной памяти. Данное устройство измерений названо подсистемой с предварительно программируемой фокусировкой, или подсистемой с префокусировкой. Для успешной работы подобной подсистемы необходимо, чтобы траектории предварительного и рабочего сканирования топологии контролируемой УИС совпадали с точностью до ширины сканирующего луча. Данное условие не является жестким и при использовании в создаваемых УИМ современных систем числового программного управления реализуется достаточно просто.

## ПОДСИСТЕМА ПРЕФОКУСИРОВКИ КРУГОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ АЭ.1686

Подсистема предварительно программируемой фокусировки микрообъектива *Nikon MUE 10500*, входящего в состав считывающей головки КИДУ модели АЭ.1686, была выполнена на основе линейного позиционирующего столика модели *Nano-OP65M* фирмы *Mad City Labs* (США) [8]. Функциональная схема подсистемы префокусировки приведена на рис. 1.

Микрообъектив жестко закрепляется на линейном позиционирующем столике, который с помощью штатного высоковольтного драйвера смещает микрообъектив на требуемое расстояние под воздействием аналогового управляющего сигнала, снимаемого с выхода цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).



**Рис. 1.** Функциональная схема подсистемы префокусировки. 1 — микрообъектив, 2 — линейный позиционирующий столик, 3 — высоковольтный драйвер столика, 4 — цифро-аналоговый преобразователь, 5 — буферный регистр, 6 — цифровой потенциометр, 7 — блок оперативной памяти.

Управляющий аналоговый сигнал формируется из цифрового кода, поступающего на вход ЦАП в виде параллельного кода с выходов буферного регистра блока памяти.

Содержимое блока памяти формируется в ходе предварительной калибровки подсистемы. Для этого оператор с помощью операционного монитора установки АЭ.1686 [1] переводит всю систему в режим предварительной калибровки, при которой он имеет возможность вывести считывающую головку установки на выбранный радиус сканирования топологии контролируемой УИС и зафиксировать каретку линейных перемещений на этом радиусе. С помощью прецизионного поворотного стола установки [1] он устанавливает контролируемую УИС на исходную нулевую угловую позицию. Кроме того, на этой позиции он предварительно устанавливает цифровой потенциометр в среднее положение. Затем с помощью штатного микровинта, входящего в состав считывающей головки установки, приводит микрообъектив в положение, в котором достигается максимальный контраст изображения топологии УИС на заданной позиции. Контроль контраста изображения структуры оператор отслеживает с помощью технологического монитора [1]. Значения кодов цифрового потенциометра и углового датчика прецизионного поворотного стола установки, при которых достигается максимальный кон-

траст изображения топологии УИС, запоминаются в блоке памяти. После этого оператор начинает медленное сканирование топологии контролируемой УИС по выбранной круговой траектории, оценивая с помощью технологического монитора качество фокусировки микрообъектива. Выявив возникшее ухудшение контраста изображения УИС, оператор фиксирует поворотный стол на этой текущей угловой координате и теперь уже с помощью цифрового потенциометра, ЦАП, драйвера и столика восстанавливает на технологическом мониторе максимальный контраст изображения топологии контролируемой УИС, формируемый с помощью микрообъектива. Для этого оператор изменяет выходной код цифрового потенциометра в нужном направлении относительно его предыдущего состояния. Полученные параметры выходных кодов цифрового потенциометра и углового датчика поворотного стола оператор запоминает в блоке памяти. После этого оператор возобновляет медленное сканирование топологии УИС до следующего ухудшения контраста изображения, при выявлении которого он снова останавливает сканирование, фиксирует поворотный стол в этом положении и повторяет операции наведения на фокус с помощью цифрового потенциометра, ЦАП, драйвера, столика и запоминания текущих кодов цифрового потенциометра и углового датчика поворотного стола.

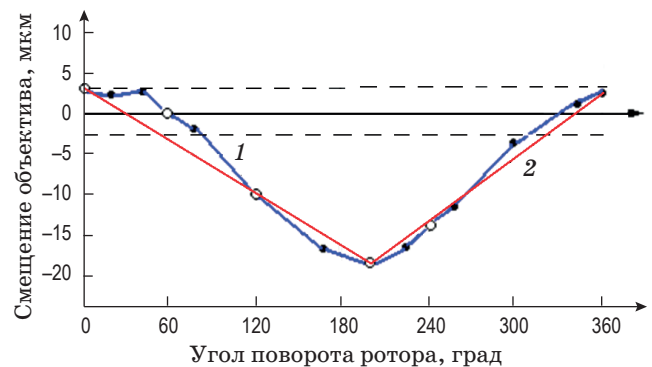
Затем оператор снова продолжает калибровку системы фокусировки, запоминая коды полученных параметров, вплоть до завершения полного оборота стола. После этого оператор переводит систему в режим измерений. В этом режиме происходит считывание информации из блока памяти: вначале из ячейки с адресом, соответствующим нулевой угловой позиции, а затем происходит автоматическое считывание из блока памяти управляющих кодов для ЦАП при совпадении текущего кода углового датчика УИМ с угловым адресом каждой из последующих установок для ЦАП.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕФОКУСИРОВКИ МИКРООБЪЕКТИВА

Для иллюстрации эффективности применения режима префокусировки в установках типа АЭ.1686 в таблице представлены микроизображения топологии растра с количеством штрихов 8192 в различных угловых позициях поворотного стола с выключенной и с включенной подсистемой префокусировки. На рис. 2 представлена кривая, пропорциональная сигналу управления подсистемой префокусировки. Согласно представленному графику сигнала управления расфокусировка микрообъектива КИДУ (т.е. уход топологии растра от плоскости наилучшей фокусировки на  $\pm 3$  мкм и более) наблюдается в угловом

секторе растра с  $85^\circ$  (1930-й штрих) по  $310^\circ$  (7050-й штрих).

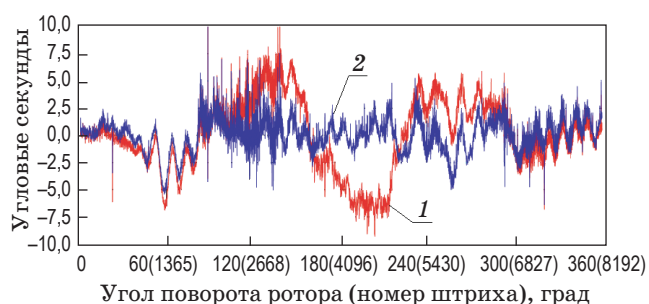
Для оценки эффективности применения подсистемы префокусировки определим некоторые количественные характеристики условий измерений. Из приведенного на рис. 2 графика нетрудно определить, что общая девиация микрообъектива лежит в пределах от  $+3$  до  $-19$  мкм, что составляет диапазон 22 мкм. Этот ход микрообъектива целесо-



**Рис. 2.** График сигнала управления линейным столиком подсистемы префокусировки. Сигнал управления подсистемой префокусировки (1) и вклад клиновидности подложки (2). Штриховыми линиями выделена рабочая область при отсутствии режима префокусировки, черными точками указаны (выборочно) позиции, в которых проводилась коррекция положения микрообъектива, а светлыми точками — позиции, фокусировка в которых представлена микрофотографиями в таблице.

### Микроизображения топологии растра в различных позициях ротора шпинделя в режимах с выключенной и включенной подсистемой префокусировки

Угол поворота ротора	Градусы	0	60	120	190	240
	№ штриха	0	1365	2730	4323	5461
Без системы префокусировки						
С системой префокусировки						



**Рис. 3.** Эффективность использования подсистемы префокусировки. Графики погрешности раstra, полученные с выключенной (1) и с включенной (2) подсистемой префокусировки.

образно связать с клиновидностью стеклянной подложки, а неплоскостность рабочей оптической поверхности — с отклонениями сигнала управления от линейного закона. Для их определения соединим красной линией светлую точку с координатой  $0^\circ$  на графике сигнала управления (рис. 2) с такой же светлой точкой, но с координатой  $200^\circ$ . Далее эту же линию соединим с темной точкой с координатой  $360^\circ$ . Максимальные отклонения реального графика управления от линейного закона составляют  $(+3, -1,5)$  мкм. Именно эти показатели можно связать с неплоскостностью рабочей оптической поверхности стеклянной подложки.

На рис. 3 представлен график погрешности раstra, полученный с выключенной подсистемой префокусировки (кривая 1). Здесь же представлен график погрешности раstra, полученный с включенной подсистемой префокусировки (кривая 2). На этих графиках наиболее заметные расхождения в значениях регистрируемой погрешности раstra наблюдаются, начиная со  $100^\circ$  (2270-й штрих) и по  $280^\circ$  (6370-й штрих), что хорошо коррелируется с данными, соответствующими графику управляющего сигнала подсистемы префокусировки, где значительные отклонения заре-

гистрированы с  $85^\circ$  (1930-й штрих) раstra по  $310^\circ$  (7050-й штрих). В некоторых секторах различия в регистрируемых значениях достигают  $7''$ .

Как показывает опыт эксплуатации подсистемы префокусировки считывающей головки КИДУ модели АЭ.1686, в большинстве случаев оператору установки достаточно выполнить в режиме предварительной калибровки контроль в 10–15 точках. Если учесть, что контроль одной точки занимает время порядка 2 мин (в это время входят следующие действия: установка поворотного стола в текущую угловую координату, определение максимального контраста изображения топологии УИС на заданной позиции, запись параметров управления в блок памяти), то общее время подготовительной операции составляет 20–30 мин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана эффективность использования режима префокусировки микрообъектива считывающей головки КИДУ модели АЭ.1686, позволяющего повысить точность и воспроизводимость измерений при наличии таких отклонений как неплоскостность рабочей поверхности и клиновидности стеклянных носителей УИС.

Использование в качестве исполнительного элемента системы префокусировки линейного столика модели Nano-OP65M фирмы *Mad City Labs* (США) позволяет за счет компенсации дестабилизирующего влияния неплоскостности рабочей поверхности стеклянного носителя УИС (вплоть до  $\pm 35$  мкм) осуществлять измерение погрешности изготовления топологии структур.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания ИАиЭ СО РАН в период с 2021 по 2023 гг.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кирьянов А.В., Зотов А.А., Каракоцкий А.Г., Кирьянов В.П., Петухов А.Д., Чуканов В.В. Оперативный контроль оптических прецизионных углоизмерительных структур // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 9. С. 60–62.
2. Кирьянов А.В., Кирьянов В.П., Чуканов В.В. Использование дифференциального метода измерений для контроля точности прецизионных углоизмерительных структур // Автометрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 45–52.

3. *Кирьянов А.В., Зотов А.А., Каракоцкий А.Г., Кирьянов В.П., Петухов А.Д., Чуканов В.В.* Особенности оперативного контроля прецизионных углоизмерительных структур // Измерительная техника. 2019. № 5. С. 31–36.
4. *Кирьянов А.В., Кирьянов В.П., Волохов И.В., Бобков А.В.* Использование метода кругового сканирования для формирования и контроля топологии прецизионных фотошаблонов интегральных датчиков физических величин // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 7. С. 26–31.
5. *Кирьянов В.П., Коронкевич В.П., Наливайко В.И., Полецук А.Г.* Киноформы. Оптическая система для синтеза элементов / Препринт № 99. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979. 38 с.
6. *Ведерников В.М., Верхогляд А.Г., Гуренко В.М., Касторский Л.Б., Кирьянов А.В., Кирьянов В.П., Кокарев С.А., Саметов А.Р.* Лазерный генератор изображений для синтеза микрорельефа дифракционных оптических элементов на трехмерных осесимметричных поверхностях // Автометрия. 2004. Т. 40. № 2. С. 46–58.
7. *Верхогляд А.Г., Гуренко В.М. и др.* Способ автоматической фокусировки для записи информации на криволинейных поверхностях // Патент РФ № 2262749. Оpubл. 27.05.2010, Бюл. № 29.
8. <http://www.madcitylabs.com/nanoopseries.html>