
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.3, 519.718
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-6-538-547

НАДЕЖНОСТЬ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ

А. В. ЧЕРНЫХ¹, Ю. И. ШАНИН²

¹Институт лазерно-физических исследований „Российского федерального ядерного центра
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики“,
607188, Саров, Россия

²Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение „ЛУЧ“,
142103, Подольск, Россия
E-mail: syi@luch.com.ru

В лазерной установке непрерывного действия адаптивная оптическая система (АОС) предназначена для обеспечения требуемых пространственных характеристик волнового фронта (ВФ) лазерного пучка. В состав АОС входит два адаптивных зеркала: а) корректор наклонов (КН), устраняющий наклоны ВФ и дрожание лазерного пучка (исправляет около 84 % аберраций ВФ); б) деформируемое зеркало (ДЗ), устраняющее более высокие порядки аберраций ВФ. Здесь рассмотрен только контур управления КН. В состав контура входят: КН, датчик наклона, блок усилительный с вычислителем для выработки сигналов управления КН. С точки зрения обеспечения надежности в наиболее тяжелых условиях работает КН и наименее надежными в КН являются пьезоэлектрические актюаторы, подверженные циклическим переменным электромеханическим нагрузкам. Выполнен анализ технических решений для контура КН и требований к надежности. Выявлены критичные отказы КН: снижение пропускной способности и потеря компенсационных возможностей. Рассмотрены вопросы, связанные с надежностью элементов АОС: приводов, КН, блока управления, датчика наклонов. Приведена структурная схема АОС КН и проведена оценка комплексного показателя надежности — коэффициента оперативной готовности. Для подтверждения надежности разработанных элементов АОС КН были проведены расчетные оценки и испытания наиболее ответственных элементов, представлены некоторые результаты экспериментальной отработки. Показано, что разработанные элементы контура КН удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

Ключевые слова: адаптивная оптическая система, деформируемое зеркало, корректор наклонов, лазерная установка, датчик наклонов, пьезоэлектрический актюатор, блок усилительный, надежность, коэффициент оперативной готовности

Введение. Основные решения по элементной базе адаптивных оптических систем (АОС) для коррекции наклонов пучков света известны и частично отработаны [1].

Вопросы надежности АОС практически не освещены в литературе. Наименее надежны в контуре коррекции наклонов волнового фронта (ВФ) излучения пьезоэлектрические актюаторы (входящие в состав корректора наклонов, КН) и их конструктивное оформление в привод

(наличие в нем клеевых соединений), поскольку они подвергаются циклическим переменным электромеханическим нагрузкам. В случае выхода привода из строя необходимы его оперативная замена и повторная юстировка всей АОС. Другие электронные компоненты адаптивной системы (сенсор датчика наклона, блок усилительный — БУ, вычислитель специализированный) в течение срока службы системы испытывают большое количество включений и выключений (минимально $\sim 5,5 \cdot 10^4$).

На стадии разработки конструкторской документации на АОС показатели надежности оцениваются расчетными методами в соответствии с ГОСТ 27.301-95*. Несмотря на то что теория надежности технических, в том числе и электронных, систем достаточно хорошо разработана [2], ее приложений к оценке надежности АОС нет. Задача построения расчетной модели надежности АОС заключается в идентификации объекта, определении отказов, выборе метода расчета, адекватного особенностям АОС, составлении расчетной модели для определения коэффициента оперативной готовности системы, получении и подтверждении исходных данных для расчета и вычисления показателей надежности АОС.

Для обоснования и отработки надежности АОС также проводятся экспериментальные исследования элементов контура КН.

Анализ технических решений и требований по надежности. Схемы различных АОС, включающие КН, приведены в [1]. Типичная схема включает деформируемое зеркало (ДЗ), КН и датчики. В качестве анализатора лазерного пучка в схеме устанавливается датчик волнового фронта. Излучение лазера попадает на деформируемое зеркало, корректор наклонов, телескоп и уходит к объекту. Опорное излучение от объекта через телескоп, корректор наклонов и светоделитель попадает на датчик наклонов (ДН). ДН измеряет координаты энергетического центра сигнала от объекта, вырабатывает сигнал рассогласования и подает его через вычислитель и усилительную аппаратуру на КН. ДЗ предназначено для компенсации aberrаций волнового фронта высших, чем наклоны, порядков, возникающих вследствие несовершенства оптического тракта по ходу опорного излучения, термодформаций зеркал и турбулентной трассы.

В функциональных требованиях к АОС указываются основные характеристики лазерной установки (ЛУ): а) по интегральной расходимости излучения (среднеквадратичное отклонение, нестабильности углового положения (дрожание оси), расходимость на половине максимума мощности); б) по коэффициенту пропускания лазерного излучения АОС. Под надежной работой АОС контура КН подразумевается безусловное выполнение системой требований по назначению и требований по надежности. Угрозами для АОС являются потеря компенсационных возможностей и необходимого пропускания рабочего излучения, откуда можно сформулировать понятие отказов (нарушение работоспособного состояния объекта) для АОС в системе.

Снижение пропускной способности системы может быть вызвано уменьшением коэффициента зеркального отражения (КЗО) зеркал и возможным разрушением многослойного интерференционного покрытия на них. Отказы из-за потери компенсационных возможностей АОС связаны: 1) со снижением точности коррекции ВФ ниже заданного предела; 2) с ресурсным отказом элементов системы „ДН—БУ—актюатор“.

Суммарный коэффициент пропускания оптической системы T_c , состоящей из k зеркальных элементов, рассчитывается по формуле:

$$T_c = \prod_{i=1}^k K_i, \quad (1)$$

где K_i — коэффициент зеркального отражения i -го элемента. В случае одинаковых КЗО для

* ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Минск: Изд. стандартов, 2002. 12 с.

всех элементов $T_c = K^k$, а минимальный коэффициент зеркального отражения для каждого элемента — $K_{\min} \geq \sqrt[k]{T_c}$.

Отказы за счет потери компенсационных возможностей: 1) сильное уменьшение коэффициента пропускания опорного излучения в выходной части оптического тракта; 2) разъюстировка оптической системы в процессе эксплуатации; 3) термодформации оптических элементов, которые в сумме не должны превышать 20 % динамического диапазона АОС (диапазон составляет несколько микрон); 4) ресурсный отказ элементов системы „ДН—БУ—актюатор“.

Оптические поверхности элементов АОС в процессе работы искажаются под воздействием: 1) изменения эксплуатационной температуры; 2) лазерного излучения; 3) расширения актюатора вследствие разогрева. Это приводит к термическим деформациям формы оптической поверхности элементов АОС и дальнейшему искажению профиля ВФ излучения. Суммарная стрелка прогиба оптических поверхностей системы из k элементов составит:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k \Delta W_i, \quad (2)$$

где ΔW_i — прогиб i -го элемента. Для одинаковых элементов $\Delta W_{\Sigma} = k\Delta W_i$, откуда получим требование к термодформации отдельного элемента $\Delta W_i \leq \Delta W_{\Sigma} / k$. Обычно ДЗ может выдержать тепловой поток ~ 100 Вт/м² без охлаждения и потери формы поверхности [3]. При прокачке воздуха через массив актюаторов со скоростью 10 м/с зеркало остается стабильным до 500 Вт/м². Угловые уходы оптической поверхности КН могут происходить за счет расширения актюатора при его разогреве в процессе работы. Диссипация мощности в актюаторе может составлять от 0,1 до 1 Вт/актюатор [3]. По оценкам, при отработке промышленно выпускаемым актюатором АПМ-2-15 [4], используемым в КН, фазовых искажений с частотой 20 Гц и амплитудой 10 В в течение 8 минут актюатор перегреется на ~ 13 °С и расширится на 0,64 мкм (угловой уход поверхности зеркала КН $\sim 8,5 \cdot 10^{-6}$ рад, или $\sim 1,75''$), что составляет ~ 5 % динамического диапазона КН.

Нестабильность формы поверхности оптических элементов вследствие изменения эксплуатационной температуры может быть нивелирована грамотным проектированием конструкции КН и подлежит экспериментальному определению.

В наиболее тяжелых условиях работает пьезоэлектрический актюатор, так как он преобразует электрическую энергию в механическую и является силовым элементом, на который воздействуют статические и динамические нагрузки. Минимальное количество переключений актюатора ($\sim 5,5 \cdot 10^4$) рассчитывается из суточной временной циклограммы работы ЛУ и срока эксплуатации системы. Для КН с общим числом приводов от 2 до 4 отказ даже одного привода приводит к потере компенсационных возможностей системы. Ресурс КН равен ресурсу отдельного актюатора — $2 \cdot 10^8$ циклов.

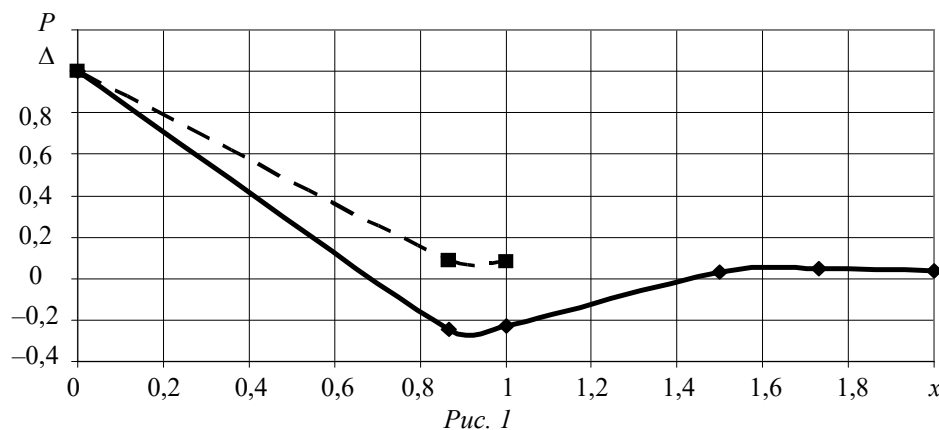
Согласно требованиям и ГОСТ 27.301 для АОС, работающей в составе лазерной установки непрерывного действия, могут задаваться следующие показатели надежности: 1) коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ для требуемого времени безотказной работы $t_{бр}$; 2) среднее время восстановления $T_{в}$; 3) средний ресурс до капитального ремонта $T_{р.кр.р.}$; 4) средний срок службы до капитального ремонта $T_{сл.кр.р.}$. Коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ является комплексным показателем надежности и означает „вероятность того, что изделие в данный момент времени t_1 находится в работоспособном состоянии, начиная с этого момента, выполнит требуемую функцию при данных условиях в интервале (t_1, t_2) “.

Надежность элементов АОС коррекции наклонов. Ниже проанализированы известные данные об элементах АОС и приведены результаты некоторых расчетных исследований в обоснование их надежности.

Приводы. Привод состоит из пьезоэлектрического актюатора и ряда механических элементов, передающих усилие на оптическую пластину КН. В работе [3] сообщается о возможной частоте отказов актюаторов: ~ 1 на 200 каналов. При стремлении к высокой надежности актюаторов одновременно нужно обеспечивать ремонтпригодность КН путем замены актюаторов. По оценкам [5], число отказов актюаторов в год составляет $0,01N_A$ (N_A — число актюаторов в зеркале). Сведения, приведенные нами ранее [6], относятся к надежности и эксплуатационным характеристикам отечественных актюаторов, изготовленных из пьезокерамики ЦТС [7].

При работе многослойных актюаторов в динамическом режиме для исключения влияния растягивающих напряжений, которые лимитируют наработку актюаторов, рекомендуется при их установке в привод КН обеспечить условия предварительного сжатия в пределах от 10 до 15 МПа.

Деформируемое зеркало (корректор наклонов). Наиболее слабым местом в ДЗ (или КН) является клеевое соединение толкателя привода с подложкой зеркала. Здесь приводятся некоторые результаты расчетных оценок возникающих в этих соединениях напряжений. Рассмотрим отражающую пластину зеркала как упругую. В предположении, что максимальные силы упругости пластины (толщина 3 мм, материал — ситалл СО115М) возникают в случае движения одного центрального привода при остальных неподвижных приводах, были оценены силы на ближайших приводах и перемещения оптической поверхности [1]. На рис. 1 отражены зависимости распределения сил (\blacklozenge) и перемещения (\blacksquare) в относительных координатах P и Δ от относительного расстояния между приводами x . Силы для приводов P нормированы на максимальную силу $P_M=221$ Н, возникающую при перемещении центрального привода на 8 мкм. Координата x нормирована на шаг установки привода, перемещение Δ нормировано на максимальное перемещение центрального привода ($\Delta_M=8$ мкм). В клеевом соединении „толкатель—пластина“ возникают напряжения $\sim 2,6$ МПа. Прочность клея К-400 при 20 °С на растяжение составляет от 14,7 до 9,6 МПа. Таким образом, имеется более чем пятикратный запас по прочности. Вместе с тем клеевое соединение испытывает многократные циклические нагрузки.



Вспомогательная аппаратура: ДН, БУ с вычислителем. Применяемые для управления КН блоки усилительные состоят из двух типов заменяемых узлов: усилительных плат и блока питания. БУ работают в благоприятных условиях, поскольку применяемые усилители потребляют при работе в 4,5 раза меньше энергии, чем традиционные. Количество включений усилительной аппаратуры для установки поверхности зеркала КН при юстировке определяется циклограммой работы АОС в составе ЛУ и оценивается в $5,5 \cdot 10^4$ (при максимальных значениях электрического напряжения на приводах, которые являются наиболее тяжелыми условиями работы БУ). Для ускорения испытаний БУ число включений можно имитировать, запустив блок в режиме меандра с максимальной (или половинной от 0 до 60 В) амплитудой

и небольшой (~ 1 Гц) частотой, чтобы не вызывать разогрев элементов. При этом время испытаний составит $5,5 \cdot 10^4 \cdot 1 \text{ с} / 3600 \text{ с} = 15,3$ ч. Мощность, необходимая для запитки актюатора, пропорциональна емкости пьезоэлектрического актюатора, частоте и квадрату напряжения тока, подаваемого на него. Интегральная величина мощности за время службы актюатора может служить параметром сравнения и использоваться при выборе режимов нагружения актюатора для ускоренных испытаний надежности блока питания.

Наиболее чувствительными элементами в датчиках наклона являются оптическая система формирования изображения и сенсорная часть, представляющая собой видеокамеру на базе ПЗС-матрицы. Наиболее неблагоприятными факторами для датчиков являются механические и климатические нагрузки, а также большое число включений аппаратуры, которое в нашем случае не является критичным.

Для КН АОС используются специализированные вычислители, которые по требованиям стойкости, прочности и устойчивости к внешним факторам удовлетворяют условиям эксплуатации системы в течение всего срока службы. В электронных и электрических системах наиболее уязвимы элементы соединительных коммуникаций — разъемы (соединители). При соединении БУ с КН используются соединители типа СНЦ, имеющие минимальный срок хранения 15 лет, при температуре 105°C минимальная наработка составляет также $1,3 \cdot 10^5$ ч (что почти на 1,5 порядка превышает ресурс работы АОС до капитального ремонта) при 500 сочленений—расчленений.

Модель АОС коррекции наклонов. Контур управления КН АОС ЛУ включает: систему оптического тракта (СОТ), ДН, БУ, включающий исполнительные механизмы — актюаторы (А). Структурная схема элементарной цепочки управления представлена на рис. 2 (СОТ приведена для полноты модели, т.к. ее ресурсный отказ маловероятен).

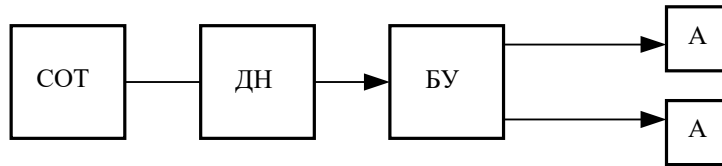


Рис. 2

Для рассмотрения принята модель с последовательным соединением независимых элементов [2], отказ одного из элементов которой приводит к отказу всей системы. Считаем, что отказы элементов являются независимыми, т.е. отказ любой группы элементов не влияет на вероятностные характеристики остальных элементов. Для такой системы случайная наработка $\theta^{(1)}$ до отказа определяется минимальным значением случайных наработок $\theta_i^{(1)}$ ее элементов

$$\theta^{(1)} = \min_{1 \leq i \leq m} \theta_i^{(1)}, \quad (3)$$

где m — число последовательных элементов (в нашем случае $m = 3$). При известных распределениях наработок до отказа отдельных независимых элементов $P_i(t)$ вероятность того, что наработка до отказа окажется больше заданного времени работы t_0 — $P(t_0)$, определяется по формуле:

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^m P_i(t_0). \quad (4)$$

Если распределение наработки до отказа у каждого элемента является экспоненциальным $P_i(t_0) = \exp(-\lambda_i t_0)$, то показатели надежности такой системы для точных выражений запишутся как

$$P(t_0) = \exp(-\Lambda t_0), \quad Q(t_0) = 1 - \exp(-\Lambda t_0), \quad (5)$$

и для приближенных выражений (при условии $\Lambda t_0 \ll 1$):

$$P(t_0) = 1 - \Lambda t_0, \quad Q(t_0) = \Lambda t_0, \quad (6)$$

где λ [1/ч] — частота отказов — математическое ожидание числа отказов объекта с восстановлением в единицу времени для установившегося процесса эксплуатации, $P(t_0)$ — вероятность того, что наработка до отказа окажется больше заданного времени работы t_0 , $Q(t_0)$ — вероятность отказа объекта в интервале времени от 0 до t_0 , $\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$, $T=1/\Lambda$ — время средней наработки до отказа.

Надежность системы определяется надежностью „наиболее слабого звена“ — КН или актюаторов. Весь интервал времени работы актюатора до отказа можно разделить на три части: 1) период приработки или обкатки; 2) период нормальной эксплуатации, характеризующийся примерно постоянной и сравнительно низкой интенсивностью отказов; 3) период старения и износа. По техническим условиям для актюаторов типа АПМ-2 завод-изготовитель гарантирует среднюю наработку на отказ в типовом режиме эксплуатации (температура +35 °С, максимальная амплитуда напряжения) не менее $2 \cdot 10^8$ циклов переключений в пределах срока службы 10 лет [4, 7]. По нашим оценкам, максимальная наработка актюаторов в составе КН за 10 лет службы составит менее 1 млн циклов при суммарной наработке системы $t_0=7300$ ч. Исходя из экспоненциального закона наработки на отказ и времени срока службы 10 лет ($t_0=87\,600$ ч) оценим частоту отказов актюаторов: $P_i(t_0) = 0,5 = \exp(-\lambda_A t_0)$, откуда $\lambda_A = \ln 2 / t_0 = 7,91 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Вероятность безотказной работы актюатора для времени суммарной наработки адаптивной системы ($t_0=7300$ ч) дает $P_A=0,937$. Если положить, что средняя наработка на отказ ограничена лишь числом циклов, то для наших условий время срока службы актюатора составит $t_0=1,46 \cdot 10^6$ ч, частота отказов $\lambda_A = \ln 2 / t_0 = 4,75 \cdot 10^{-7}$ 1/ч, вероятность безотказной работы для времени суммарной наработки АОС ($t_0=7300$ ч) равна $P_A=0,9965$.

Оценка коэффициента оперативной готовности $K_{ог}$. При оценке $K_{ог}$ КН нужно использовать подход, связанный с восстановлением работоспособности КН (заменой актюаторов). $K_{ог}(t_{бр})$ для требуемого времени безотказной работы $t_{бр}$ означает: вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, составляет более $K_{ог}$ для произвольного момента времени включения системы, и будет работать безотказно в течение $t_{бр}^{**}$. Таким образом, $K_{ог}$ является итогом произведения вероятности безотказного включения системы, характеризуемой коэффициентом готовности $K_{г}^{**}$, на вероятность безотказной работы системы $P_{бр}$ в течение времени $t_{бр}$:

$$K_{ог} = K_{г} P_{бр}. \quad (7)$$

Процесс функционирования восстанавливаемого элемента описывается как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и простоя [2]. При произвольном распределении наработки до отказа стационарный коэффициент готовности $K_{г}$ определяется по формуле:

$$K_{г} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{в}}, \quad (8)$$

где T_{cp} — время наработки на средний ресурс (для актюатора $T_{cp}=87\,600$ ч); $T_{в}$ — время восстановления. Если известно, что распределение наработки между отказами является „стареющим“, то $K_{ог}$ имеет верхнюю и нижнюю границы: $K_{г}(1 - t_0 / T) \leq K_{ог}(t_0) \leq K_{г} \exp(-t_0 / T)$. В случае экспоненциального распределения наработки до отказа [2] стационарный коэффициент оперативной готовности $K_{ог}(t_0)$ определяется по формуле:

$$K_{ог}(t_0) = K_{г} \exp(-\lambda t_0). \quad (9)$$

Оценки $K_{г}$ системы с восстанавливаемыми элементами по формуле (8) при $T_{cp}=87\,600$ ч и $T_{в}=2$ ч дают $K_{гА}=0,999\,977$, вероятность безотказной работы системы „ДН—БУ—актюатор“ в

** ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. М.: Госстандарт СССР, 1989. 26 с.

течение заданного времени $t_{\text{бр}}$ должна быть не менее $P_{\text{бр}} = 0,999\ 93$.

Если предположить, что при среднем сроке службы АОС работает в динамическом режиме с частотой 20 Гц, то число циклов переключений актюатора может превысить его ресурс в 2,6 раза, и тогда дважды потребуется заменить актюатор. Экспериментальные данные [1] показывают, что реальная частота фазовых искажений (наклонов ВФ излучения) в системе их коррекции не превышает 20 Гц. Также амплитуда фазовых искажений экспоненциально уменьшается с повышением их частоты. Спектры фазовых искажений при работе КН ЛУ по реальным объектам показывают, что большие амплитуды (вызывающие подачу больших напряжений на актюаторы) могут возникать на очень низких частотах (1—5 Гц), а амплитуда более высоких частот (например, 16 Гц) составляет менее 5 % от амплитуды на низких частотах. Можно оценить число циклов до начала разрушения керамики актюатора, считая, что оно пропорционально произведению частоты на амплитуду поворота доменов в керамике. Тогда мерой такой оценки может быть интеграл от амплитуды A в диапазоне рабочих частот

$\int_0^{f_{\text{max}}} A(f)df$ при экспоненциальном распределении $A(f) = A_0 \exp(-bf/f_{\text{max}})$. Также подобные оцен-

ки были проведены исходя из результатов экспериментальных исследований амплитудно-частотных характеристик угловых фазовых искажений при наблюдении за реальным объектом без коррекции и с коррекцией наклонов ВФ. Результаты этих оценок сравнивались с результатами ресурсных испытаний, проведенных при подаче на актюатор синусоидального напряжения с амплитудой 50 В от подставки 50 В и частотой 50 Гц. Сравнение показало, что в случае допущения об экспоненциальном уменьшении амплитуды искажений с ростом их частоты ресурс актюатора для условий эксплуатации окажется в 6,6 раза больше среднего ресурса в условиях испытаний. В случае исправления КН реального спектра фазовых искажений ресурс актюатора может быть увеличен примерно в 15 раз. Эти оценки также показали, что даже при ресурсе актюатора в $2 \cdot 10^8$ циклов коэффициент оперативной готовности будет обеспечен в течение всего среднего срока службы АОС (10 лет) вообще без замены актюаторов.

Некоторые результаты испытаний элементов АОС. На этапе разработки конструкторской документации на АОС ЛУ делаются только расчетное обоснование и экспертные оценки надежности. Нами проведены некоторые эксперименты по обоснованию надежности на макетных и экспериментальных образцах АОС.

Измерение коэффициента зеркального отражения. На полированную переднюю оптическую поверхность зеркальной пластины наносились чередующиеся слои покрытий с различными коэффициентами преломления. Эти покрытия имеют некоторую пористость и поры могут насыщаться водой. При замораживании и размораживании такое покрытие предположительно может изменять КЗО в сторону уменьшения. Испытания проводились на образце-свидетеле из стекла К-8 диаметром 25 мм с многослойным интерференционным покрытием из слоев окислов двух различных материалов (один с более высоким, другой — с более низким коэффициентом преломления). Образец подвергался многократному термоциклированию в диапазоне от -20 до $+20$ °С. В процессе испытаний измерялись спектральные характеристики образца на спектрофотометре Cary 300 Scan, настроенном на определение коэффициента пропускания. Установлено, что в результате десяти циклов „нагрев—остывание“ значение коэффициента пропускания не изменилось.

Испытания корректора наклонов проводились как автономно, так и в составе макетной АОС. В испытаниях определялись различные характеристики КН: 1) стабильность положения корректора на подставке 60 В при работе КН в условиях, близких к штатным; 2) температура поверхности актюатора в составе корректора при работе в различных режимах; 3) временная стабильность коррекции углов наклона в составе макета АОС.

Поскольку пьезоэлектрические актюаторы обладают гистерезисом, практический интерес представляет способность КН к восстановлению от первоначального положения отражающей поверхности зеркала относительно оптической оси после цикла „работа—перерыв“. В начале эксперимента на оба актюатора КН подавалось постоянное напряжение 60 В (подставка) и записывались координаты светового пятна на координатно-чувствительном датчике (КЧД). Затем на оба актюатора в течение 8 мин подавалось от постоянной подставки напряжением 60 В гармоническое напряжение амплитудой 40 В и частотой 20 Гц. После снятия переменного напряжения каждые 25 с записывались координаты светового пятна на КЧД, находилось среднее арифметическое значение по каждой координате и среднеквадратичное отклонение, и вычислялись средние значения углов отклонений от первоначального положения нормали к отражающей поверхности КН. Установлено, что через 100 с после снятия переменного напряжения угол отклонения светового пучка от первоначального положения не превышал $-0,2'' \pm 0,2''$ по азимуту и $0,5'' \pm 0,2''$ по углу места.

При испытаниях проводились также измерения температуры поверхности актюаторов. Результаты измерений представлены на рис. 3 (а — в процессе работы, б — после прекращения подачи гармонического напряжения; напряжение подставки 50 В; 1 — амплитуда 50 В, частота 50 Гц, 2 — 50 В, 100 Гц, 3 — 40 В, 10 Гц), видно, что в условиях эксплуатации разогрев актюаторов не является критичным и ниже указанных значений.

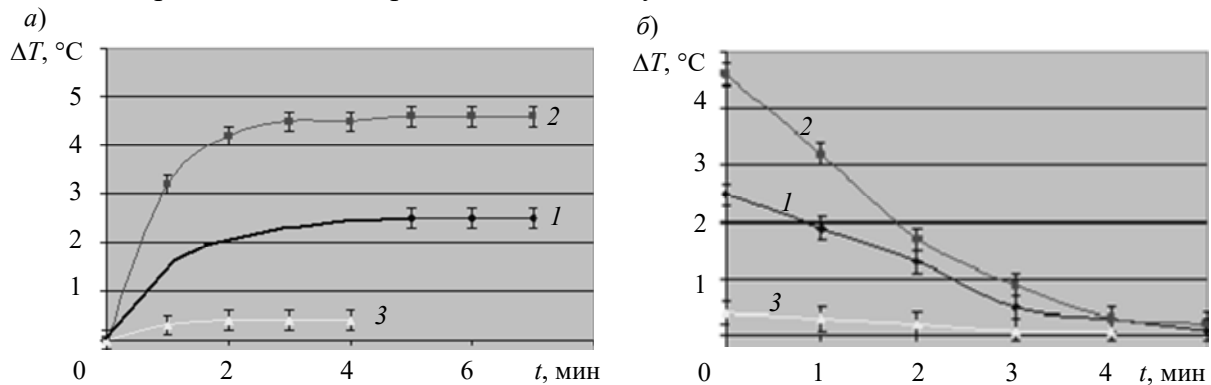


Рис. 3

С целью проверки временной стабильности коррекции углов наклона были проведены испытания экспериментальной АОС на основе КН. С интервалом в 15 ч проведены две серии экспериментов. В этих сериях экспериментов по исследованию зависимости частоты считывания данных датчиком наклонов от измеренных остаточных ошибок коррекции существенных отклонений не выявлено, что свидетельствует о сохранении АОС требуемой стабильности.

Испытания клевого соединения. Испытания на циклическую прочность клевого соединения зеркальной пластины с толкателем привода проводились на специально спроектированном и изготовленном макете ДЗ [1], представляющем собой семиканальный фрагмент зеркала [6].

Заключение. Указаны два наиболее критичных отказа системы: возможное снижение коэффициента зеркального отражения и вызываемая им потеря пропускной способности, потеря компенсационных возможностей, которые являются следствием отказов отдельных элементов системы (выхода из строя актюаторов, оптических покрытий, блоков усилительных). Нарушение оптического покрытия лишь на одном из оптических элементов АОС может привести к отказу всей системы. Наибольшее внимание по обеспечению надежности необходимо уделять актюаторам корректора наклонов и каналам усиления БУ. В качестве показателей надежности можно использовать среднюю наработку на отказ для элементов системы, а в качестве комплексного показателя надежности — коэффициент оперативной готовности системы. Результаты по надежности подтверждаются расчетными оценками, исследованиями и испытаниями экспериментальных образцов отдельных элементов и макетов АОС. Анализ ампли-

тудно-частотных спектров работы корректора наклонов при проведении натуральных испытаний свидетельствует о возможности достижения целевого значения $K_{ог}$ без замены актюаторов.

Настоящую работу авторы посвящают коллеге, другу и брату док. техн. наук, профессору Олегу Ивановичу Шанину, рано покинувшему нас и не успевшему опубликовать приведенные материалы, авторство большей части которых принадлежит ему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013. 296 с.
2. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
3. Aldrich R. E. Deformable mirror wavefront correctors // Adaptive optics engineering handbook. NY: Marsel Dekker, 2000. P. 151—197.
4. Сафронов А., Климашин В., Парфенов Б., Ярошевич В., Никифоров В. Пьезокерамические пакетные и моноблочные актюаторы // Компоненты и технологии. 2002. № 6. С. 26—28.
5. Sechaud M. Wave-front compensation devices // Adaptive Optics in Astronomy / Ed. by F. Roddier. Cambridge: University Press, 1999. P. 57—90.
6. Черных А. В., Шанин Ю. И. Надежность элементов адаптивной оптической системы импульсных мощных лазерных установок // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 133—142.
7. Никифоров В. Г. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы: Теория и практика. М.: ОАО „НИИ „Элпа“, 2010. 68 с.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Черных

— канд. техн. наук; Институт лазерно-физических исследований „Российского федерального ядерного центра Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики“;
E-mail: 1958av@mail.ru

Юрий Иванович Шанин

— канд. техн. наук, старший научн. сотрудник; Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение „ЛУЧ“; E-mail: syi@luch.com.ru

Поступила в редакцию
17.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Черных А. В., Шанин Ю. И. Надежность адаптивной оптической системы коррекции наклонов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 6. С. 538—547.

RELIABILITY OF ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM OF TILT CORRECTION

A. V. Chernykh¹, Yu. I. Shanin²

¹ Institute of Laser Physics Research of Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, 607188, Sarov, Russia

² Luch Scientific Production Association, 142103, Podolsk, Russia
E-mail: syi@luch.com.ru

Laser installation of continuous action is included in an adaptive optical system (AOS) intended for ensuring the required spatial characteristics of the laser beam wave front (WF). The AOS contains two active mirrors: a) the tilt corrector (TC) eliminating the slopes of WF and of the laser beam jitter (corrects about 84 % of WF aberrations), and b) the deformable mirror (DM) eliminating higher orders of the WF aberrations. Control loop of the TC considered in the paper includes tilt corrector, tilt sensor, amplifying unit with a special calculator to generate TC control signals. From the point of view of ensuring dependability in the most difficult conditions, the tilt corrector works. The least dependable in the tilt corrector are piezoelectric actuators subject to cyclic variable electromechanical loads. Technical solutions for control loop of the tilt corrector are analyzed and the reliability requirements are formulated. As a result of the analysis, the critical failures of TC are indicated: reduction in transmitted bandwidth and a loss of compensation ca-

pabilities. Several issues related to reliability of the AOS elements – drives, TC, control unit, tilt sensor – are considered. A block diagram of the AOS TC is presented and the integrated reliability ratio – the instantaneous operating availability – is evaluated. Reliability of the developed AOC TC elements is confirmed by calculated estimates and presented results of experimental tests of the most critical elements. The developed elements of the control loop TC are shown to meet the imposed requirements.

Keywords: adaptive optical system, deformable mirror, tilt corrector, laser installation, tilt sensor, piezoelectric actuator, amplifying unit, reliability, instantaneous operating availability coefficient

REFERENCES

1. Shanin O.I. *Adaptivnyye opticheskiye sistemy korrektsii naklonov. Rezonansnaya adaptivnaya optika* (Adaptive Optical Tilt Correction Systems. Resonant adaptive optics), Moscow, 2013, 296 p. (in Russ.)
2. Ushakov I.A., ed., *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. Spravochnik* (Reliability of Technical Systems. Directory), 1985, 608 p. (in Russ.)
3. Aldrich R.E. *Adaptive Optics Engineering Handbook*, NY, Marsel Dekker, 2000, pp. 151–197.
4. Safronov A., Klimashin V., Parfenov B., Yaroshevich V., Nikiforov V. *Komponenty i tekhnologii*, 2002, no. 6, pp. 26–28.
5. Sechaud M. *Adaptive Optics in Astronomy*, Roddier F., ed., Cambridge, University Press, 1999, pp. 57–90.
6. Chernykh A.V., Shanin Yu.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 2(63), pp. 133–142. (in Russ.)
7. Nikiforov V.G. *Mnogosloynnye p'yezoelektricheskiye aktyuatory: Teoriya i praktika* (Multilayer Piezoelectric Actuators: Theory and Practice), Moscow, 2010, 68 p. (in Russ.)

Data on authors

Alexander V. Chernykh

— PhD; Institute of Laser Physics Research of Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics; E-mail: 1958av@mail.ru

Yury I. Shanin

— PhD, Senior Scientist; Luch Scientific Production Association; E-mail: syi@luch.com.ru

For citation: Chernykh A. V., Shanin Yu. I. Reliability of adaptive optical system of tilt correction. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 6. P. 539–547 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-6-538-547