

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.373.8, 519.718  
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-133-142

## НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНЫХ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

А. В. ЧЕРНЫХ<sup>1</sup>, Ю. И. ШАНИН<sup>2</sup>

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

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

Применяемая в импульсных мощных лазерных установках инерционного термоядерного синтеза адаптивная оптическая система (АОС) предназначена для обеспечения требуемых пространственных характеристик волнового фронта лазерного пучка. В состав АОС входят: деформируемое зеркало (ДЗ), датчик волнового фронта, блок усилительный, компьютер для вычислений и управления. Повышенные требования к надежности компонент лазерных установок продиктованы высокой стоимостью их владения. Наименее надежными в системе являются актюаторы приводов (входящие в состав ДЗ), т.к. они подвержены циклическим переменным электромеханическим нагрузкам. Проанализированы технические решения АОС и требования к надежности. Указаны два наиболее критичных отказа системы: деградация оптических свойств оптической поверхности ДЗ, потеря компенсационных возможностей. В качестве показателя надежности для элементов АОС можно использовать среднюю наработку на отказ. Для АОС в целом надежность характеризуют комплексный показатель надежности, показатели долговечности и сохраняемости. Рассмотрены вопросы, связанные с надежностью элементов АОС. Приведена структурная схема модуля АОС и проведена оценка комплексного показателя надежности — коэффициента сохранения эффективности. Для подтверждения надежности разработанной АОС были проведены испытания отдельных ее элементов. Созданные элементы АОС удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

**Ключевые слова:** адаптивная оптическая система, деформируемое зеркало, система автоматического регулирования, импульсная мощная лазерная установка, датчик волнового фронта, пьезоэлектрический привод, актюатор, блок усилительный, надежность, коэффициент сохранения эффективности

**Введение.** Импульсные мощные лазерные установки (ИМЛУ) планируется использовать для получения систематических знаний о свойствах и поведении различных материалов при параметрах, реализующихся в термоядерных реакциях, включая осуществление инерционного лазерного термоядерного синтеза. Адаптивная оптическая система (АОС) ИМЛУ [1— 3] предназначена для обеспечения требуемых пространственных характеристик волнового фронта (ВФ) лазерного пучка путем управления формой волнового фронта лазерного излучения. Управление ВФ с помощью адаптивной оптики осуществляется системой автоматического

регулирования (САР). В состав САР одного канала (или модуля) АОС входят: деформируемое зеркало (ДЗ), датчик волнового фронта (ДВФ), блок усилительный (БУ), компьютер для вычислений и управления (ПК). ИМЛУ представляет собой многоканальную систему, в которую входят несколько десятков каналов (модулей) АОС. Для повышения надежности элементов АОС проектируется и изготавливается в сетевом исполнении, т.е. ДВФ, фильтры и БУ представляют собой сетевые устройства и коммутируются с вычислительными средствами через сеть Ethernet. С точки зрения обеспечения надежности в наиболее тяжелых условиях эксплуатируется корректирующее ВФ излучения устройство — ДЗ. Основные решения по элементной базе АОС известны [1, 2] и частично отработаны на ИМЛУ „Луч“ [3].

Повышенные требования к надежности компонентов лазерных установок также продиктованы высокой стоимостью их владения. Несмотря на достаточно полную отработку деталей и узлов конструкции АОС ИМЛУ [1—3], вопросы надежности элементов АОС практически не освещены в литературе. Присущая ИМЛУ многоканальность не требует повышения надежности отдельных элементов АОС. Наименее надежными в системе являются актюаторы (входящие в состав приводов ДЗ). Например, при надежности одного привода 99,99 % общая надежность приводов в составе всей установки составит лишь 31 %. В связи с этим возникает необходимость оперативной замены приводов и повторной оптической юстировки всей системы [4]. В такой ситуации нужны особые методы повышения надежности системы.

На стадии разработки конструкторской документации АОС оценки показателей надежности проводятся 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 [5], ее приложений к оценке надежности АОС нет. В настоящей работе приведены результаты исследований по обоснованию надежности основных элементов АОС.

**Анализ технических решений и требований по надежности АОС.** Система управления (САР) АОС волнового фронта ИМЛУ выполняет следующие функции: 1) управление ВФ лазерного пучка в каждом канале на первой гармонике перед выстрелом; 2) предкоррекция предварительно измеренного термоиндуцированного искажения ВФ; 3) измерение ВФ лазерного импульса системы на выходе из канала; 4) контроль ВФ на выходе (включая направление) во время стандартной работы системы между импульсами, например, во время наведения.

АОС состоит из пяти подсистем [1]: ДЗ, ДВФ, компьютерная система управления ВФ, эталон ВФ и система „Т-1“ (позволяет в течение секунды реконфигурировать установку с моды управления ВФ в моду выстрела). САР АОС ИМЛУ работает в нескольких режимах: режим калибровки ДВФ, работа с замкнутым контуром управления при юстировке, работа с замкнутым контуром для записи формы ВФ при импульсе силового лазерного излучения, работа с замкнутым контуром при установке нужной формы поверхности ДЗ, работа с открытым контуром при поддержании выставленной формы поверхности ДЗ.

ДЗ позволяет [6]: 1) существенно облегчить юстировку оптического тракта и наведение излучения на мишень; 2) скомпенсировать фазовые искажения, индуцированные накачкой; 3) осуществлять коррекцию ВФ в случае различных конфигураций лазерных усилителей; 4) проводить коррекцию фазовых искажений, вызванных остаточными термическими искажениями в оптических элементах, которые различны в различные периоды времени; 5) проводить коррекцию термических неоднородностей на участках, наполненных газом, вдоль лучевой линии; 6) снижать себестоимость крупногабаритных оптических элементов с приемлемой плоскостностью и однородностью. ДЗ корректирует низкочастотные пространственные фазовые искажения лазерного излучения ИМЛУ. Оптическая поверхность ДЗ сформирована на пластине толщиной 9 мм из оптического ситалла СО115М и имеет зеркальное интерфе-

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

ренионное покрытие. Приводы (61 шт.), воздействующие на оптическую пластину ДЗ с целью придания нужной формы оптической поверхности ДЗ, изготовлены на основе микропленочного пьезоэлектрического актюатора АПМ-2-7 [7] и в шахматном порядке установлены в корпусе зеркала. Рабочий диапазон управляющих напряжений актюатора однонаправленного действия от 0 до 120 В. Положительное перемещение оптической поверхности передается от актюатора через толкатель на оптическую пластину зеркала, обратное перемещение обеспечивается общей пружиной.

Выполненный по схеме Шака—Гартмана [3] ДВФ позволяет измерять характеристики излучения: форму ВФ, направление оси излучения, амплитуду и среднеквадратическое отклонение ВФ. Он работает с непрерывным (юстировка и калибровка) лазерным излучением. В состав ДВФ входят: телекамера с интерфейсной платой, линзовый растр, монтажные элементы, ослабитель излучения, компьютер со специализированным программным обеспечением. В качестве базовой камеры ДВФ была выбрана MV1-D1312I-80-GB12 [8].

Компьютерная система управления предназначена для анализа и архивации показаний ДВФ и выработки сигналов коррекции положения актюаторов ДЗ.

Угрозами (и отказами) для АОС являются потеря компенсационных возможностей и потенциальное уменьшение коэффициента зеркального отражения (КЗО) оптических элементов. Отказы из-за потери компенсационных возможностей АОС связаны: 1) со снижением точности коррекции ВФ ниже заданного предела; 2) с ресурсным отказом элементов системы „ДВФ—блок усилительный—актюатор“.

Заданная точность установления необходимого ВФ обеспечивается точными измерениями ВФ и повышением точности позиционирования элементов оптической поверхности, а также температурной и временной стабильностью оптической поверхности ДЗ. Точность коррекции ВФ задается двумя параметрами: остаточными аберрациями ВФ (среднеквадратическим отклонением, СКО, от нужной формы) и целевой расходимостью излучения на выходе установки после коррекции. На точность коррекции ВФ влияют выбор числа приводов, их чувствительности и схема их размещения на апертуре ДЗ.

Наиболее тяжелые условия функционирования в ДЗ у актюатора — силового элемента, преобразующий электрическую энергию в механическую и подвергающегося воздействию статических и динамических нагрузок. По оценкам [3], количество циклов переключения актюатора за заданный срок службы зеркала в составе ИМЛУ (10 лет) составит:  $4 \cdot 10^4$  скачков с большой амплитудой ( $\sim 3,5$  мкм) и  $2,2 \cdot 10^5$  итераций с амплитудой менее 1 мкм. Отказ даже одного актюатора в статических условиях приводит к потере компенсационных возможностей [3]. Применяемые в ДЗ актюаторы АПМ-2-7 [7] допускают  $2 \cdot 10^8$  циклов переключений до наработки на отказ и имеют большой запас надежности.

Повышение надежности элементов адаптивной системы (датчиков и усилительной аппаратуры) сводится к их своевременной блочной замене.

**Надежность элементов АОС.** Для подобных объектов показателями надежности являются\*\* комплексный показатель надежности (характеризует несколько свойств), показатели долговечности и сохраняемости.

Проанализируем известные данные об элементах АОС и приведем результаты некоторых расчетных исследований в обоснование их надежности.

**Привод** состоит из актюатора и ряда механических элементов, передающих усилие на оптическую пластину ДЗ через приклеиваемые к ней толкатели. В работе [9] сообщается об ожидаемой частоте отказов актюаторов:  $\sim 1$  на 200 каналов. Для обеспечения высокой надежности актюаторов одновременно нужно обеспечивать ремонтпригодность ДЗ заменой

---

\*\* ГОСТ 27.003-90. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартинформ, 2007. 19 с.

актюаторов. По оценкам [10], число отказов актюаторов в год составляет  $0,01N_A$ , где  $N_A$  — число актюаторов в зеркале (в пересчете на число актюаторов в ИМЛЮ, где  $N_A = 11\,712$ , число отказов может составлять 117 в год). Срок службы и надежность актюатора из пьезокерамики ЦТС [11] определяются при двух экстремальных условиях работы: 1) статический режим при высоком возбуждающем напряжении; 2) интенсивный динамический режим, характеризующийся потенциально большими внутренними напряжениями вследствие внешних усилий, действующих на актюатор.

Актюаторы ДЗ для ИМЛЮ склеивают из отдельных блоков пьезокерамики ЦТС-46. В блок размером  $6 \times 6 \times 2,7$  мм входят 50 поляризованных слоев (толщина каждого 50 мкм) и 4 неполяризованных. Толщина электродных пластин 4 мкм, максимальный ход блока — 2,5 мкм.

В процессе испытаний многослойных актюаторов наработку на отказ наблюдались: а) отказы на этапе изготовления, б) отказы износа при длительной эксплуатации. При длительной эксплуатации средняя наработка на отказ зависит не только от конструктивных параметров, но и режима эксплуатации, температуры окружающей среды, влажности (наиболее сильная зависимость) и напряженности электрического поля. В настоящее время в нормальных условиях срок службы многослойных актюаторов в статическом режиме составляет более 10 000 ч, срок хранения в нерабочем состоянии свыше 20 лет, частота отказов многослойных актюаторов в промышленной аппаратуре менее 1 % за 5 лет. В динамических режимах работы достигнуто время наработки более  $5 \cdot 10^9$  циклов.

**Деформируемое зеркало.** Наиболее слабым местом в ДЗ является клеевое соединение толкателя привода с подложкой из ситалла. Рассмотрим отражающую пластину зеркала как упругую. В предположении, что максимальные силы упругости пластины возникают в случае движения одного привода при остальных неподвижных, были оценены силы на приводах и перемещения оптической поверхности [3].

На рис. 1 приведен график распределения сил ( $\blacklozenge$ ) и перемещений ( $\blacksquare$ ) в относительных координатах  $P$  и  $\Delta$  в зависимости от относительного расстояния между приводами  $x$ . Силы на приводах  $P$  нормированы на максимальную силу  $P_M$ , возникающую при перемещении центрального привода на 8 мкм ( $P_M = 446$  Н). Координата  $x$  нормирована на шаг установки привода ( $t = 54,5$  мм). Перемещение  $\Delta$  нормировано на максимальное перемещение центрального привода ( $\Delta_M = 8$  мкм).

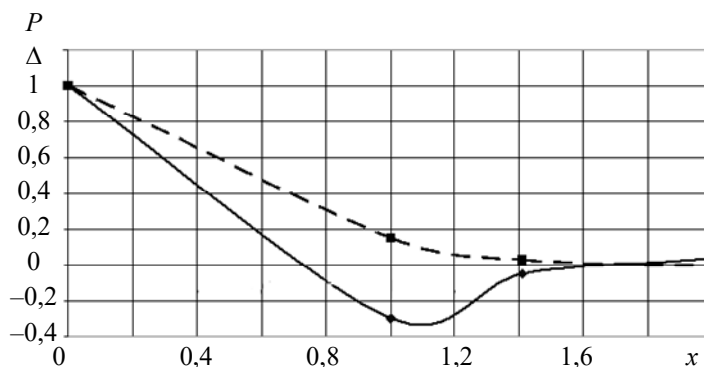


Рис. 1

Продольное напряжение в пластине в центральной точке — 8,65 МПа. Прочность при изгибе ситалла СО115М — 166 МПа. Актюатор предварительно зажимался с усилием  $\sim 200$  Н. В актюаторе при поперечных размерах  $6 \times 6$  мм возникает напряжение сжатия  $(200 + 446) \text{ Н} / (36 \cdot 10^{-6}) \text{ м}^2 \approx 18$  МПа. При этом предел прочности пьезокерамики на сжатие составляет 300—400 МПа. Возникающие в клеевом соединении „толкатель—пластина“ напряжения составляют 2,23 МПа. Прочность применяемого клея К-400 при 20 °С на растяжение составляет от 9,6 до 14,7 МПа. Вместе с тем клеевое соединение испытывает многократные циклические нагрузки.

Оптическая поверхность ДЗ в процессе работы искажается [3] под воздействием: 1) изменения эксплуатационной температуры в диапазоне  $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$  в соответствии с формулой  $\text{СКО}_n = 0,0155t + 0,162$  мкм, где  $t$  — температура,  $^\circ\text{C}$  [3]; 2) вспышки ламп накачки перед выстрелом (инваровая основа ДЗ прогибается не более чем на 0,2 мкм); 3) нестабильности актюатора и блока усилительного.

*Вспомогательная аппаратура.* Блоки усилительные состоят из двух типов заменяемых узлов: усилительных плат и блока питания. БУ работают в благоприятных условиях, т.к. они потребляют в 4,5 раза меньше энергии, чем традиционные. При обнулении напряжения на актюаторах БУ потребляет ~50 Вт, а контроллер в режиме сна — около 5 Вт. Указанные факторы позволяют обеспечить высокую функциональную надежность усилительной аппаратуры. В течение ресурса БУ может испытывать большое количество включений и выключений. При обосновании надежности БУ необходимо проводить испытания на их многократные переключения с большой амплитудой, а также ускоренные ресурсные испытания. Набор необходимых за время эксплуатации 40 000 включений БУ можно имитировать, запустив блок в режиме меандра с максимальной 120 В (или половинной, или от 0 до 60 В) амплитудой и небольшой (~1 Гц) частотой, чтобы не вызывать разогрев элементов. При этом время испытаний составит примерно 11,1 ч.

Наиболее чувствительными элементами в ДВФ являются оптическая система формирования изображения и сенсорная часть, представляющая собой видеокамеру на базе кремниевой КМОП-матрицы. Число включений аппаратуры, равное 40 000 за весь срок службы, не так критично, так как подключение сенсорной части осуществляется через ЭВМ обработки данных. Энергопотребление телекамеры марки MV1-D1312I-80-GB12 не превышает 5 Вт.

В АОС используется вычислительная техника для обработки и архивирования данных и в качестве контроллеров исполнительных устройств. В силу длительного применения ЭВМ вопросы надежности этих устройств достаточно проработаны для обеспечения круглосуточной работы. На стадии эксплуатации ИМЛУ управление АОС будет осуществляться специализированными вычислителями, ориентированными на решаемую задачу. Физическая связь элементов АОС осуществляется посредством электрических и оптических коммуникаций. Наиболее уязвимыми элементами электронных и электрических систем являются элементы соединительных коммуникаций, в частности, разъемы (соединители). При соединении БУ с ДЗ используются соединители типа СНЦ23.

**Модель АОС и оценка коэффициента сохранения эффективности.** Задача построения расчетной модели надежности АОС заключается в идентификации объекта, определении отказов, выборе комплексного показателя надежности и метода расчета, адекватного особенностям АОС, составлении расчетной модели для определения коэффициента сохранения эффективности, получении и подтверждении исходных данных для расчета и вычислении показателей надежности.

Расчетная модель АОС ИМЛУ включает оптическую часть (ОЧ) ДЗ, ДВФ, компьютерную систему управления, в том числе БУ, и актюаторы (А) ДЗ. Структурная схема элементарной цепочки управления представлена на рис. 2. Для рассмотрения принята модель с последовательным соединением независимых элементов [5], 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

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

где  $m$  — число 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  $t_0$ , определяется по формуле:

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^m P_i(t_0). \quad (2)$$

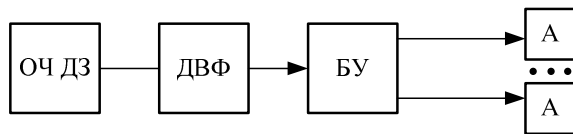


Рис. 2

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:

$$P(t_0) = \exp(-\Lambda t_0), \quad Q(t_0) = 1 - \exp(-\Lambda t_0), \quad (3)$$

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

$$P(t_0) = 1 - \Lambda t_0, \quad Q(t_0) = \Lambda t_0, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — частота отказов,  $1/\lambda$  — математическое ожидание числа отказов объекта с восстановлением в единицу времени для установившегося процесса эксплуатации,  $Q(t_0)$  — вероятность отказа объекта в интервале времени от 0 до  $t_0$ ,  $\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ ,  $T=1/\Lambda$  — средняя наработка до отказа.

Обоснованно считаем, что надежность системы определяется надежностью „наиболее слабого звена“ — ДЗ или надежностью актюаторов. Весь интервал времени работы актюатора до отказа можно разделить: 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 завод-изготовитель гарантирует среднюю наработку на отказ актюатора типа АПМ-2 в типовом режиме эксплуатации (температура  $+35^\circ\text{C}$ , максимальная амплитуда напряжения) не менее  $2 \cdot 10^8$  циклов переключений в пределах срока службы 10 лет. По нашим оценкам, за это время актюатор в составе ДЗ совершит  $2,6 \cdot 10^5$  циклов и только  $4 \cdot 10^4$  циклов при максимальном напряжении. Если положить, что средняя наработка на отказ актюатора ограничена лишь количеством циклов, то для наших условий срок службы актюатора на полном напряжении составит  $t_0 = 0,674 \cdot 10^8$  ч, частота отказов актюаторов —  $\lambda_A = \ln 2 / t_0 = 1,03 \cdot 10^{-8}$  1/ч; при штатной работе —  $t_0 = 4,38 \cdot 10^8$  ч,  $\lambda_A = 1,58 \cdot 10^{-9}$  1/ч. В штатных условиях вероятность безотказной работы актюатора для времени наработки в течение двух лет (17 520 ч) равна  $P_{A(17520\text{ч})} = \exp(-1,58 \cdot 10^{-9} / \text{ч} \cdot 17 520 \text{ ч}) = 0,999972$ , а ДЗ с 61 приводом соответственно  $0,999972^{61} = 0,9983$ . Вероятность безотказной работы всех зеркал ИМЛУ составит  $0,9983^{192} = 0,7204$ , вероятность безотказной работы зеркал модуля ИМЛУ составит  $0,9983^8 = 0,986$ .

**Оценка коэффициента сохранения эффективности.** Коэффициент сохранения эффективности  $K_{\text{эфф}}^{***}$  есть отношение показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленного при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

Для АОС  $K_{\text{эфф}}$  определим как отношение относительной расходимости излучения (измеренной энергетической расходимости к дифракционной) модуля АОС (определяемой как корень квадратный из суммы квадратов относительной расходимости восьми каналов) в выстреле или серии выстрелов к выбранной или заданной. Критерием оптимизации АОС канала ИМЛУ можно установить зависимость для относительной расходимости  $\bar{\Omega}$  [3]:

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

$$\bar{\Omega} = \Omega / \Omega_d = \left( \exp \left( \frac{2\pi\Delta\Phi}{\lambda} \right)^2 \left( 1 + \left( \frac{2,22\alpha_n 2a}{\lambda} \right)^2 \right) \right)^{1/2} = f_1^{1/2}(\Delta\Phi) f_2^{1/2}(\alpha_n) \Rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $\Omega_d = 2\lambda/2a \approx 5 \cdot 10^{-6}$  рад — дифракционная расходимость ИМЛУ,  $2a$  — сторона квадратной поверхности ДЗ,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\Delta\Phi$  = СКО,  $\alpha_n$  — угол дрожания лазерного пучка. Применение зависимости (5) корректно при небольших значениях  $\Delta\Phi$  и  $\alpha_n$ . Целевое значение расходимости составляет  $\Omega_{ц} = 2 \cdot 10^{-5}$  рад, тогда  $\bar{\Omega}_{ц} = 4$ . При заданном максимальном значении СКО  $\leq 0,2$  мкм —  $f_1^{1/2} \approx 2$ , а при СКО  $\leq 0,1$  мкм —  $f_1^{1/2} \approx 1,19$ , т.е. на повышение точности коррекции сильно влияет фактор  $f_1$ . Для ИМЛУ „Луч“ [3] были проведены расчеты значения критерия  $\bar{\Omega}_{ц}$  в зависимости от числа приводов  $N$  на апертуре ДЗ и получена аппроксимирующая зависимость  $\bar{\Omega} = \Omega / \Omega_d \approx 470 / N^{0,92}$ . Оценки по ней числа приводов, необходимо-

го для достижения дифракционной расходимости ( $\bar{\Omega} = 1$ ), на ИМЛУ „Луч“ дали значение  $N_d \approx 796$ . Таким образом, для единичного силового канала ИМЛУ в качестве  $K_{эфф}$  можно принять относительную расходимость. Для оценки качества АОС модуля ИМЛУ (8 ДЗ) важно, чтобы средняя расходимость была не менее заданной, т.е. чтобы в пятне заданного размера

концентрировалась определенная энергия:  $\Omega_{ср} / \Omega_d = \sqrt{0,125 \sum_{i=1}^8 \Omega_i^2} / \Omega_d \leq 4$ . Если часть сило-

вых каналов будет иметь малую расходимость, то для какой-то части можно допустить более высокую — такую, чтобы суммарная энергия в фокальном пятне была не меньше заданной. При переходе к полной конфигурации ИМЛУ (с учетом всех каналов) комплексный показатель надежности может измениться.

**Результаты испытаний элементов АОС.** Нами были проведены некоторые эксперименты по обоснованию надежности на макетных и экспериментальных образцах АОС, предназначенных для ИМЛУ „Луч“ и „Искра-6“.

*Актюаторы ДЗ.* Наблюдались отказы актюаторов из-за: 1) высокой скорости подачи напряжения на актюатор — 50 кВ/с вместо 20, 2) более низкого по отношению к заявляемому внутреннего сопротивления, 3) отсутствия выходных испытаний на статическую выдержку под напряжением. Принятые меры по исправлению этих недостатков позволили повысить надежность работы актюаторов в составе ДЗ до требуемого уровня.

*Геометрическая стабильность оптической поверхности ДЗ.* Испытания циклической прочности клеевого соединения зеркальной пластины с толкателем привода проводились на специально спроектированных и изготовленных макетах ДЗ [3]. В одном из макетов зеркальная пластина выполнялась из ситалла СО115М с многослойным покрытием, обеспечивающим КЗО не менее 99,3 %. В качестве управляющих приводов (9 шт.) использовались опытные образцы пьезоэлектрических приводов ППУ-0,5 [11]. Присоединение зеркальной пластины к управляющим приводам осуществлялось при помощи клея К-400 через толкатели, выполненные из сплава 36Н и имеющие развитые плоскую поверхность со стороны зеркальной пластины и цилиндрическую поверхность со стороны приводов. В серии экспериментов по нагружению центрального привода напряжениями  $\pm 100, 200, 300$  В (при этом развиваемое приводом усилие соответственно равнялось 104, 209, 313 Н) было выполнено  $2,1 \cdot 10^4$  циклов без разрушения клеевого соединения. В следующей серии экспериментов с подачей только  $\pm 300$  В отрыв толкателя центрального привода от пластины произошел после проведения  $1,02 \cdot 10^5$  циклов. В следующей серии экспериментов приводы нагружались напряжением 300 В (усилие на приводах 98 Н), действующим в противофазе на угловые и срединные приводы. При наборе  $1,284 \cdot 10^6$  циклов не наблюдалось никаких изменений. На другом фрагменте ДЗ оптическая пластина диаметром 45 мм и толщиной 3,5 мм была выполнена из ситалла

СО115М. Семь актюаторов АПМ-2-7 располагались равномерно по гексагональной упаковке с минимальным расстоянием между приводами 15 мм. Диаметр приклеенных к подложке толкателей составлял 8 мм. Были проведены следующие испытания циклической прочности клеевого соединения: 1) циклирование одного актюатора от подставки 60 В с амплитудой 20 В и частотой 80 Гц — 20 млн циклов; 2) циклирование пяти актюаторов от подставки 60 В с амплитудой  $\pm 50$  В и частотой 100 Гц — 1 млн циклов; 3) циклирование центрального актюатора от подставки 50 В с амплитудой  $\pm 50$  В и частотой 125 Гц (общая подставка 100 В) — 1 млн циклов. При всех нагружениях по всем семи толкателям разрушений клеевого соединения не произошло. Расчетные усилия на клеевой шов составили: для центрального толкателя при прогибе пластины 5 мкм — 270 Н, для периферийных приводов при прогибе 4 мкм — 43 Н. Максимальные напряжения, возникающие при испытаниях в клеевых швах, составляли 5,42 МПа при прочности клея К-400 на отрыв  $\sim 15$  МПа. Уровень максимальных напряжений в реальном ДЗ  $\sim 2,23$  МПа.

*Температурная и временная стабильность оптической поверхности ДЗ.* Температурная стабильность формы оптической поверхности исследовалась при изменении температуры среды, в которой находились зеркало и его юстировочный узел. Для конструкций зеркал установки „Луч“ достигнута практически полная температурная стабильность при изменении температуры окружающей среды до 5 °С от установленного эксплуатационного уровня. Например, для одного из макетов ДЗ установлена незначительная зависимость среднеквадратичного отклонения поверхности от температуры [3]:  $СКО_{\text{п}}=0,0155t+0,162$  [мкм], где  $t$  — уровень температуры (°С). Изменение  $СКО_{\text{п}}$  при изменении температуры на 0,25 К (уровень дрейфа температуры окружающей среды в установке „Луч“) составило  $\sim 0,004$  мкм.

Для выяснения вопроса о стабильности удержания формы поверхности без напряжения на приводах и под напряжением (на всех приводах 100 В) в течение двух часов была поставлена серия экспериментов для ДЗ установки „Луч“ (размер оптической поверхности 220×220 мм) [3]. Интерферограммы оптической поверхности снимались с периодом 20 мин. В эксперименте отклонения в СКО изменялись в пределах 0,032 мкм, имелась слабая линейная зависимость от времени  $СКО_{\text{п}}(t)-СКО_{\text{п}}(t=0)=bt$ , где  $b=(2,0 \cdot 10^{-5}-1,57 \cdot 10^{-4})$  мкм/мин. Данный макет зеркала показал высокую временную стабильность оптической поверхности.

**Заключение.** На основе анализа заложенных в документацию решений по АОС выявлены два наиболее критичных ее отказа: возможное уменьшение КЗО оптических элементов и потеря компенсационных возможностей вследствие отказа отдельных элементов системы. Наибольшее внимание необходимо уделять надежности актюаторов ДЗ и каналам усиления БУ. В качестве показателей надежности можно использовать среднюю наработку на отказ для элементов системы, а в качестве комплексного показателя надежности — коэффициент сохранения эффективности. Результаты надежности подтверждены расчетными оценками, исследованиями и испытаниями экспериментальных образцов отдельных элементов и макетов АОС.

**Благодарность.** Данную работу авторы посвящают коллеге, другу и брату д.т.н., проф. Олегу Ивановичу Шанину, рано покинувшему нас и не успевшему опубликовать приведенные материалы, авторство большей части которых принадлежит ему.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zacharias R., Bliss E., Feldman M. et al. The National Ignition Facility (NIF) Wavefront Control System. Proc. SPIE, 1999. Vol. 3492. P. 678—692. <https://doi.org/10.1117/12.354181>.
2. Grosset-Grange C., Barnier J.-N., Chappuis C., Cortey H. Design principle and first results obtained on the LMJ deformable mirror prototype// Proc. SPIE 6584, Adaptive Optics for Laser Systems and Other Applications, 658403. 2007. P. 1—16. <https://doi.org/10.1117/12.725789>.



3. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012. 200 с.
4. Zacharias R. A., Beer N. R., Bliss E. S. et al. Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility // Opt. Eng. 2004. Vol. 43, N 12. P. 2873—2884. <https://doi.org/10.1117/1.1815331>.
5. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
6. Spaeth M. L., Manes K. R., Widmayer C. C. et al. National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture // Opt. Eng. 2004. Vol. 42, N 12. P. 2854—2865. <https://doi.org/10.1117/1.1815332>.
7. Сафронов А., Климашин В., Парфенов Б., Ярошевич В., Никифоров В. Пьезокерамические пакетные и моноблочные актюаторы // Компоненты и технологии. 2002. № 6. С. 26—28.
8. MV1-D1312(I) Gigabit Ethernet Series CMOS Area Scan Camera/User Manual/ MAN044 12/2009 V2.1. 83 p.
9. Aldrich R. E. Deformable mirror wavefront correctors // Adaptive optics engineering handbook. NY: Marsel Dekker, 2000. P. 151—197.
10. Sechaud M. Wave-front compensation devices // Adaptive Optics in Astronomy / Ed. F. Roddier. Cambridge: University Press, 1999. P. 57—90.
11. Никифоров В. Г. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы: Теория и практика. М.: 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  
09.12.19 г.

**Ссылка для цитирования:** 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.

**RELIABILITY OF ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM ELEMENTS FOR HIGH-POWER PULSED LASER INSTALLATIONS****A. V. Chernykh<sup>1</sup>, Yu. I. Shanin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics,  
607188, Sarov, Russia

<sup>2</sup>LUCH Research and Production Association, Research and Development Institute,  
142103, Podolsk, Russia  
E-mail: syi@luch.com.ru

An adaptive optical system (AOS) intended for use in high-power pulsed laser installations of inertial thermonuclear fusion, is designed to provide the required spatial characteristics of the laser beam wavefront. The composition of the AOS includes: a deformable mirror (DM), a wave front sensor, an amplifying unit, a computer for calculations and control. Increased requirements for the reliability of laser system components are dictated by the high cost of ownership. The least reliable components of the system are drives actuators (included in the DM), since they are subject to cyclic variable electromechanical loads. Technical solutions of AOS and the arising requirements to the system reliability are analyzed. The two most critical failures of the system are indicated; they are degradation of the optical properties of the coatings of the optical surface of the deformable mirror, and the loss of compensation possibilities. As dependability indicators for the elements of a system, the mean operating time to failure is proposed. Reliability of AOS as a whole may be characterized by an integrated reliability ratio, indicators of durability and persistence. Issues related to the reliability of AOS elements are considered. A block diagram of the AOS module is presented and an integrated reliability ratio - the effectiveness persistence coefficient - is evaluated. Reliability of the developed AOS is confirmed by tests of separate elements of the system. The created AOS elements are reported to meet requirements imposed to them.

**Keywords:** adaptive optical system, deformable mirror, automatic control system, high-power pulsed laser installation, wavefront sensor, piezoelectric drive, actuator, amplifying unit, reliability, effectiveness persistence coefficient

#### REFERENCES

1. Zacharias R., Bliss E., Feldman M. et al. *The National Ignition Facility (NIF) Wavefront Control System. Proc. SPIE*, 1999, vol. 3492, pp. 678–692, <https://doi.org/10.1117/12.354181>
2. Grosset-Grange C., Barnier J.-N., Chappuis C., Cortey H. *Proc. SPIE 6584, Adaptive Optics for Laser Systems and Other Applications*, 658403, 2007, pp. 1–16, <https://doi.org/10.1117/12.725789>.
3. Shanin O.I. *Adaptivnyye opticheskiye sistemy v impul'snykh moshchnykh lazernykh ustanovkakh* (Adaptive Optical Systems in Pulsed High-Power Laser Systems), Moscow, 2012, 200 p. (in Russ.)
4. Zacharias R.A. Beer N.R., Bliss E.S. et al. *Opt. Eng.*, 2004, no. 12(43), pp. 2873–2884, <https://doi.org/10.1117/1.1815331>.
5. Ushakov I.A., ed., *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. Spravochnik* (Reliability of technical systems. Directory), 1985, 608 p. (in Russ.)
6. Spaeth M.L., Manes K.R., Widmayer C.C. et al. *Opt. Eng.*, 2004, no. 12(42), pp. 2854–2865, <https://doi.org/10.1117/1.1815332>.
7. Safronov A., Klimashin V., Parfenov B., Yaroshevich V., Nikiforov V. *Komponenty i tekhnologii*, 2002, no. 6, pp. 26–28.
8. *MV1-D1312(I) Gigabit Ethernet Series CMOS Area Scan Camera*, User Manual/ MAN044 12/2009 V2.1, 83 p.
9. Aldrich R.E. *Adaptive optics engineering handbook*, NY, Marsel Dekker, 2000, pp. 151–197.
10. Sechaud M. *Adaptive Optics in Astronomy*, Roddier F., ed., Cambridge, University Press, 1999, pp. 57–90.
11. 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; Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics; E-mail: 1958av@mail.ru
- Yury I. Shanin** — PhD, Senior Scientist; LUCH Research and Production Association, Research and Development Institute; E-mail: syi@luch.com.ru

**For citation:** Chernykh A. V., Shanin Yu. I. Reliability of adaptive optical system elements for high-power pulsed laser installations. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 2. P. 133–142 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-133-142