

НАДЕЖНОСТЬ ДВУХОСЕВЫХ СКАНИРУЮЩИХ ГОЛОВОК,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ю. И. ШАНИН*, И. С. ШАРАПОВ

*Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение „ЛУЧ“,
Подольск, Россия
ShaninYul@sialuch.ru

Аннотация. Представлена двухосевая сканирующая система („сканатор“), предназначенная для использования в аддитивном производстве и осуществления селективного лазерного плавления металлических порошков. Сканатор состоит из трех самостоятельных узлов — коллиматора, сканирующей головки и F-theta-объектива, соединенных между собой. Цель работы — расчетно-экспериментальное обоснование принимаемых основных технических решений с точки зрения обеспечения надежности сканатора на этапе разработки конструкции и выпуска рабочей конструкторской документации. В соответствии со стандартами по надежности проведен анализ схемного решения и требований по надежности, рассмотрены причины возможных отказов и предельных состояний сканатора в процессе работы, представлены расчеты в обоснование работоспособности сканатора как в процессе эксплуатации, так и в условиях хранения и транспортирования. Приведены результаты тепловых расчетов коллиматора, сканирующей головки и F-theta-объектива. Описано влияние на оптические узлы конструкции низких (при хранении) и высоких (при эксплуатации) температур. Для сканирующих зеркал, установленных в сканирующей головке и подвергающихся воздействию больших угловых ускорений, выполнены прочностные расчеты, в том числе методом конечных элементов с применением программного обеспечения ANSYS. По результатам работы обоснована надежность элементов и сканатора в целом. Предложена методика расчета надежности сканатора. Изложены меры, рекомендованные для внесения изменений в конструкцию с целью повышения ее надежности. Выработанные рекомендации были реализованы в процессе изготовления опытного образца сканатора.

Ключевые слова: сканирующая головка, сканатор, сканирующее зеркало, гальвоomotor, датчик угла поворота, надежность, показатели надежности

Благодарности: работа выполнена в рамках договора от 26.12.2019 № 793/121-Д между ООО „РусАТ“ и НИИ НПО „ЛУЧ“: „Создание двухосевого сканатора для селективного лазерного плавления“.

Ссылка для цитирования: Шанин Ю. И., Шарапов И. С. Надежность двухосевых сканирующих головок, применяемых в аддитивном производстве // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 5. С. 409—422. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-409-422.

RELIABILITY OF DUAL-AXIS SCANNING HEADS USED IN ADDITIVE MANUFACTURING

Yu. I. Shanin*, I. S. Sharapov

*Scientific Production Association „LUCH“,
Podolsk, Russia
ShaninYul@sialuch.ru

Abstract. A dual-axis scanning system ("scanner") intended for use in additive production and selective laser melting of metal powders is presented. The scanner consists of three independent nodes - a collimator, a scanning head and an F-theta lens, connected to each other. The purpose of the work was a brief review and calculation and experimental justification of the main technical solutions taken in terms of ensuring the reliability of the scanner at the stage of

design development and issuance of working design documentation. In accordance with GOSTs for reliability, analysis of the circuit design and reliability requirements is carried out, causes of possible failures of the scanner during operation and possible limit states in its operation are considered, calculations are presented to substantiate the health of the scanner both during operation and in storage and transportation conditions. Thermal calculations of the collimator, scanning head, and F-theta lens are carried out. The influence of low (during storage) and high (during operation) temperatures on optical components of the design is also considered. Strength calculations, including those based on the finite element method using the ANSYS software, are performed for scanning mirrors installed in the scanning head and subjected to high angular accelerations. Results of the study testify the reliability of the elements and the scanner as a whole. A method for calculating the reliability of the scanner is proposed. Measures recommended for making changes to the design in order to increase its reliability are outlined. The developed recommendations are implemented in the process of a prototype scanner manufacturing.

Keywords: scanning head, scanner, scanning mirror, galvo, rotation angle sensor, reliability, reliability indicators

Acknowledgments: the work was performed within the framework of the contract dated December 26, 2019 No. 793/121-D between LLC RusAT and RDI SPA "LUCH": "Creation of a dual-axis scanner for selective laser melting".

For citation: Shanin Yu. I., Sharapov I. S. Reliability of dual-axis scanning heads used in additive manufacturing. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 5. P. 409—422 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-409-422.

Введение. В мире архитектура построения двухосевого сканатора хорошо отработана и апробирована на практике [1, 2] в течение более чем 25 лет. Многие зарубежные фирмы (Cambridge Technology Inc. [3], ScanLAB GmbH. [4], Raylase GmbH. [5], Sino-Galvo (Beijing) Technology Co., Ltd [6] и пр.) изготавливают линейки сканирующих головок для различных применений. Широкое использование они нашли, прежде всего, в маркировке, гравировке и других процессах поверхностной обработки. Специфические условия процесса селективного лазерного плавления обуславливают ряд дополнительных требований к элементам сканирующей головки [1, 2].

Состав сканатора можно рассматривать как три самостоятельных узла: коллиматор, сканирующая головка и F-theta-объектив. Коллиматор, расположенный между QВН-разъемом волоконного лазера и сканирующей головкой, обеспечивает расширение потока входного лазерного излучения и формирование на выходе параллельного пучка заданной апертуры. В корпусе сканирующей головки смонтированы два электрических двигателя (гальвомотора) с установленными на них сканирующими зеркалами. Гальвомоторы обеспечивают возможность кругового качания зеркал в двух взаимно перпендикулярных направлениях в пределах небольшого угла $\pm\theta$, тем самым изменяя направление оси пучка. Датчик угла поворота, устанавливаемый на одном из концов вала ротора гальвомотора, служит для выработки сигнала управления мотором и точного позиционирования сфокусированного пучка на рабочем поле. Также обычной практикой является установка в сканирующей головке плат сопряжения и управления гальвомоторами и лазером. Отметим, что электронные компоненты сканатора (блок питания и драйверы гальвомоторов, устройство сопряжения интерфейсов) в течение срока службы испытывают нагрузку в виде большого количества включений и выключений. Как правило, F-theta-объектив присоединяется к сканирующей головке с помощью резьбового соединения и служит фокусировке отклоняемого лазерного пучка в нужной точке плоского квадратного рабочего поля.

В современной литературе и разработках ведущих зарубежных фирм по сканирующим системам [1—6] вопросы надежности (reliability, dependability) сканаторов не обсуждаются, они подлежат разработке. Вместе с тем теория надежности технических систем [7] и электрических машин [8, 9] достаточно хорошо разработана. Задача построения расчетной модели надежности сканатора заключается в идентификации объекта, определении отказов, выборе методов расчета, адекватных особенностям узлов сканатора, уточнении возможности применения комплексных показателей надежности, получении и подтверждении исходных данных для расчета показателей надежности.

На основе анализа литературных данных [1, 2, 7—9] установлено, что наименее надежным в сканаторе является электромеханическое устройство — гальвомотор, так как он подвержен циклическим переменным электромеханическим нагрузкам. При определении этих нагрузок (в частности, амплитуды изменения возникающих механических напряжений в элементах и соединениях, количества циклов и пр.) использовались расчетные методы.

В настоящей статье расчетно-экспериментальными методами исследована надежность узлов и сканатора в целом. Для оценки степени воздействия тепловых и динамических нагрузок на конструкцию сканатора проведены тепловые и прочностные расчеты, подтверждающие работоспособность системы как при воздействии лазерного излучения, так и при низких и высоких температурах эксплуатации и воздействии синусоидальной вибрации, ударных нагрузок и больших угловых ускорений (для сканирующих зеркал).

Данное решение является одной из пионерских разработок в Российской Федерации в указанной области применения и направлено на импортозамещение.

Анализ схемного решения сканатора и требований по надежности. Двухосевая оптическая сканирующая система (сканатор) входит в состав аддитивного оборудования и служит для 3D печати изделий из металлических порошков по технологии селективного лазерного плавления.

Принцип действия двухосевого сканатора и схема его использования представлены на рис. 1, а, б соответственно.

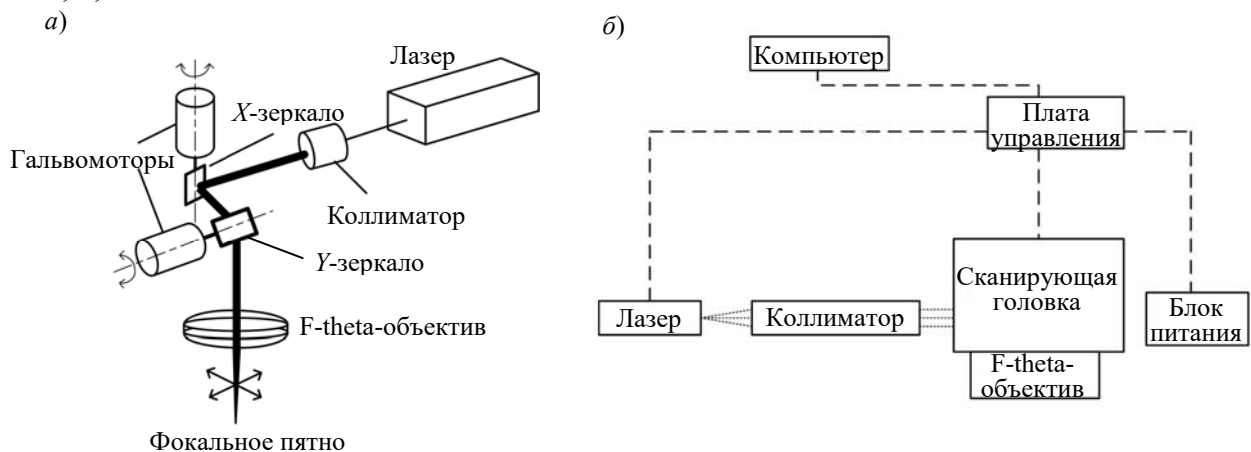


Рис. 1

Оптическое волокно иттербиевого лазера номинальной мощностью 700 Вт с длиной волны 1080 ± 1 нм сопрягается с входом коллиматора через QВН-разъем, обеспечивающий герметичность разъема и оптической оси коллиматора. Пучок лазерного излучения, выходящего из волокна, расширяется под углом $4,01^\circ$ к оптической оси в переходнике и попадает в трехлинзовый коллиматор, на выходе из которого расчетный диаметр параллельного пучка составляет 15 мм. Линзы изготовлены из кварцевого стекла и имеют на оптических поверхностях просветляющее покрытие, обеспечивающее прохождение через каждую линзу 99,6 % мощности излучения. Линзы выставлены друг относительно друга с помощью дистанционных колец. Внешний корпус коллиматора может охлаждаться либо воздухом, либо водой. Выход коллиматора через адаптер состыковывается с входным отверстием сканирующей головки. Сначала лазерный пучок попадает на сканирующее зеркало, изменяющее его направление по оси X , и далее — на сканирующее зеркало, изменяющее его направление по оси Y . Установленные в оправки зеркала крепятся к вращающемуся валу электродвигателя постоянного тока — гальвомотору. Колебание вала обеспечивается подачей возбуждающего знакопеременного напряжения на электрическую обмотку неподвижного статора. На другом конце вала расположен оптический датчик угла поворота. В нем в процессе движения вала вырабатывается пропорциональный углу поворота сигнал, который подается в регулятор (контроллер), обеспечивающий

работу системы автоматического регулирования с обратной связью. Фокусирующая система предназначена для фокусировки отклоненного сканирующими зеркалами лазерного пучка. В качестве фокусирующей системы используется четырехлинзовый F-theta-объектив. Задача зеркал — направить пучок в нужное место рабочего поля, задача объектива — получить в этом месте сфокусированное пятно определенного размера и формы. Система управления сканатором предназначена для управления с помощью контроллеров и устройства сопряжения работой двух гальвомоторов и лазера в автоматическом режиме посредством управляющей программы.

На этапе разработки рабочей конструкторской документации оценки показателей надежности сканатора должны быть проведены расчетными методами по ГОСТ 27.301-95.

Требования к надежности. Ресурс оборудования должен составлять не менее 8700 ч, срок службы оборудования — не менее 5 лет. В предположении о 250 рабочих днях в году для выработки ресурса до отказа за время срока службы оборудование должно работать ~7 ч/сутки. Вероятность безотказной работы оборудования — не менее 0,9 в течение ресурса. Оборудование техническому обслуживанию и ремонту не подлежит. Восстановление работоспособности оборудования после возникновения отказа осуществляется путем замены функциональных блоков на предприятии-изготовителе. Назначенный срок хранения оборудования не менее 5 лет в упаковке предприятия-изготовителя в складских отапливаемых помещениях. По требованиям, оборудование должно быть стойким как к воздействию предельно низкой температуры $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, так и к воздействию предельно повышенной температуры $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также необходимо оценить прочностную стойкость оборудования к действию:

— синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения 50 м/с^2 ($5g$) в диапазоне частот от 10 до 500 Гц в течение 30 ч суммарно по каждому из трех направлений;

— многократных ударов при транспортировании в упаковке.

На основе ГОСТ 27.003-90 была проведена классификация сканатора (вследствие формального характера результаты классификации здесь не приведены).

Отказы и предельные состояния. Расчеты в обоснование работоспособности. В соответствии с функциями, выполняемыми оптическими деталями сканатора, отказ оптической детали заключается в следующем:

— отклонении значений радиусов ближайших сфер за пределы допусков на изготовление;

— отклонении значений шероховатости оптических поверхностей от требований конструкторской документации;

— нарушении просветляющего покрытия линз и недопустимом уменьшении отражения от оптических поверхностей зеркал;

— превышении пределов прочности и деформаций при лазерном нагружении и пониженных/повышенных температурах хранения и эксплуатации;

— смещении оптических осей в процессе сборки коллиматора и объектива.

В гальвомоторе возможны отказы в обмотке статора, во вращающихся деталях ротора (шарикоподшипники, узлы зеркала и датчика угла поворота) и отказы (или нарушение нормального функционирования) датчиков, связанные с излишним разогревом конструкции.

Типичными критериями достижения предельных состояний деталей сканатора могут быть:

— отказ одной или нескольких составных частей;

— механический износ ответственных деталей (узлов);

— снижение наработки на отказ.

Структурная схема надежности узлов сканатора является последовательной. Соответственно, отказ любого из его элементов может привести к отказу сканатора.

На основе анализа видов, последствий и критичности отказов (согласно ГОСТ 27.310-95) главной угрозой для сканатора является потеря возможностей выполнять вообще или правильно рабочий процесс — быстро доставлять в заданную точку рабочего поля необходимую энергию с заданной точностью позиционирования сфокусированного пятна. Были выделены две группы отказов сканатора:

- 1) отказы, которые могут приводить к частичной потере работоспособности из-за возможных тепловых и динамических перегрузок в его узлах и элементах;
- 2) отказы, приводящие к полной потере работоспособности из-за проблем с гальвомоторами.

Последовательно рассмотрены возможные причины отказов и расчетно оценена степень их влияния на работоспособность сканатора.

Тепловые расчеты. Тепловое состояние узлов сканатора может оказывать воздействие на его работоспособность. Источниками тепловыделений в сканаторе являются лазерное излучение, проходящее через оптический тракт сканатора и частично поглощаемое в нем, и разогрев гальвомоторов, вызванный омическим нагревом статорных катушек при прохождении по электрическим проводам рабочего тока. Сильный перегрев оптических элементов относительно температуры окружающей среды может приводить к появлению термодформаций и оптических аберраций, вызываемых изменениями температурного состояния как оптических элементов, так и элементов конструкции. Различие в коэффициентах линейного расширения оптических и конструкционных материалов сканатора может сказываться на изменении оптических характеристик узлов и деталей при изменениях их температуры. Уровни тепловых нагрузок, возникающих при работе лазера и мотора, были оценены в различных узлах сканатора. Также рассмотрено теплонпряженное состояние оптических узлов коллиматора и F-theta-объектива при воздействии на них пониженных и повышенных температур, характерных как для условий хранения сканатора, так и его работы.

С учетом мощности передаваемой энергии детали конструкции коллиматора цилиндрической формы с внешним диаметром 40 мм и длиной 38 мм могут поглощать от 47,5 до 107,5 Вт мощности излучения, попадающего на оправы линз. Расчеты показывают, что охлаждения коллиматора естественной конвекцией окружающим воздухом недостаточно. Поперечное и продольное ребрение помогает развить теплообменную поверхность. Согласно проведенным расчетам установлено, что в случае поглощенной в коллиматоре мощности, равной 47,5 Вт, может быть использовано ребрение с поперечными ребрами (шаг $t_p=5$ мм, толщина ребра $\delta_p=2$ мм, число ребер $N_p=14$, высота ребра $h_p=25$ мм, коэффициент развития поверхности $K_f=17,3$, средний коэффициент теплоотдачи $\alpha=7$ Вт/(м²·К)) и с продольными ребрами ($N_p=30$, $h_p=35$ мм, $K_f=19,8$, $\alpha=7$ Вт/(м²·К)). Но если тепловыделение в коллиматоре составляет порядка 107,5 Вт, то естественного охлаждения ребренной поверхности не хватает и надо рассматривать принудительное охлаждение.

Анализ случая вынужденного воздушного охлаждения ребренной внешней поверхности коллиматора ($t_p=7$ мм, $\delta_p=3$ мм, $N_p=5$, $K_f=12$) показал, что при снятии 47,5 Вт перегрев конструкции составит 31,8 °С, а при снятии 107,5 Вт — 71,5 °С. При принудительном водяном охлаждении коллиматора с помощью прокачки воды через рубашку охлаждения в кольцевом канале рубашки охлаждения высотой 2 мм и шириной 23 мм и скорости протекающей воды $w_b=0,1$ м/с реализуется ламинарный режим течения (число Рейнольдса $Re=470$) и коэффициент поверхностной теплоотдачи $\alpha_p=1,25 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К). При этом расчетный температурный напор между нагретой стенкой и жидкостью для самого напряженного случая составит 32,7 °С. При надлежащем увеличении диаметра линз в коллиматоре можно избежать попадания излучения на оправы, при этом принудительное охлаждение коллиматора может рассматриваться как дополнительная опция, подключаемая при необходимости.

В сканирующей головке находятся два гальвомотора, закрепленные в кронштейны, которые, в свою очередь, крепятся винтами к крышкам корпуса. На гальвомоторах с помощью оправок установлены сканирующие зеркала. Максимальная поглощаемая зеркалом тепловая мощность составляет 2,8 Вт. Для линз F-theta-объектива установлен уровень рассеяния (а следовательно, поглощения) $\rho_\lambda \leq 0,3$ %. На четырех линзах поглощается мощность 16,8 Вт. В предположении, что по обмотке статора гальвомотора с активным сопротивлением Θ проходит осредненный по времени ток $I_{ст}$, оценены максимально возможные потери мощности на нагрев по формуле $Q_{гм} = I_{ст}^2 \cdot \Theta$, тогда для $\Theta = 2,2$ Ом и $I_{ст} = 3,5$ А значение $Q_{гм} \approx 27$ Вт. Если не будет учитываться незначительное выделение тепла печатными платами управления и радиационный нагрев головки излучением от рабочей зоны процесса, то в объеме сканирующей головки может выделяться максимальная мощность $Q_{ст} = 2Q_3 + Q_{об} + 2Q_{гм} = 2 \cdot 2,8 + 16,8 + 2 \cdot 27 = 76,4$ Вт, где Q_3 и $Q_{об}$ — тепловыделение зеркала и F-theta-объектива соответственно.

При упрощенном рассмотрении охлаждаемая поверхность сканирующей головки представляет собой параллелепипед, имеющий две боковые вертикальные ребренные стенки, переднюю и заднюю вертикальные стенки, горизонтальные крышку и основание, изготовленные из алюминиевого сплава. Теплоотдача стенок головки рассчитывалась для естественной конвекции в большом объеме, максимальная избыточная температура стенки головки при работе не превышала $\vartheta = 26,8$ °С. При расчетах получено следующее уравнение, связывающее теплосъем $Q_{\Sigma ст}$ с избыточной температурой стенки ϑ сканирующей головки:

$$\vartheta = -1,1 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{\Sigma ст}^2 + 0,427 Q_{\Sigma ст} + 0,7. \quad (1)$$

По литературным данным [10—12], КПД бесколлекторных электродвигателей постоянного тока, применяемых в гальвомоторах, достаточно высок (от 70 до 90 %) в случае плавного варьирования электрической мощности электронным регулятором хода. При таком КПД тепловыделение одного гальвомотора не превысит $Q_{гм} = 2,7 \dots 8,1$ Вт, а избыточная температура головки будет находиться в диапазоне $\vartheta = 11,7 \dots 15,5$ °С.

Оценивалось также влияние пониженной и повышенной температуры на узлы, содержащие оптические детали, — коллиматор и F-theta-объектив. Изменения температуры вызывают характерное расширение или сжатие линз по отношению к материалам монтажных как в осевом, так и в радиальном направлениях.

Коэффициент линейного расширения (КЛР) материала оправы, как правило, превышает КЛР установленной в ней оптики. В обычном случае снижение температуры приводит к тому, что опора сжимается в радиальном направлении к ободу оптического элемента. Расчеты теплонапряженного состояния линз коллиматора и объектива показали, что назначенных допусков на изготовление линз и оправ достаточно для обеспечения нормальной их работы (без возникновения радиальных напряжений) при изменении температуры в диапазоне $-20 \dots +50$ °С.

Также было проанализировано поведение оптических сборок в осевом направлении при изменении внешней температуры и воздействующих на конструкцию ускорений при синусоидальной перегрузке и ударном нагружении. Основное влияние оказывает величина усилия поджатия пружинного кольца, обеспечивающего гарантированное нераскрытие сборки как при пониженной, так и при повышенной температуре. Напряжение сжатия между дистанционным кольцом и линзой при температуре сборки (20 °С) составляет $4,75 \cdot 10^4$ Па, при пониженной температуре (-20 °С) — $7,12 \cdot 10^4$ Па. Данные напряжения являются оценками снизу (в силу явно завышенных в расчетах значений контактных площадей между дистанционным кольцом и линзой), но незначительными по сравнению с пределом прочности материала линз (кварц) на сжатие (50 МПа).

Как следует из расчетов, оптические детали и узлы сканирующей головки сохраняют свою работоспособность при действии лазерного излучения, а также и при изменении температуры окружающей среды и воздействии синусоидальных и ударных перегрузок.

Прочностные расчеты. При позиционировании сканирующие зеркала подвергаются большим угловым ускорениям. При проектировании зеркал можно использовать следующую эмпирическую формулу [1] для оценки прогиба оптической поверхности:

$$\Omega = 0,0055\varepsilon\rho S^5 / (EH^2), \quad (2)$$

где Ω — максимальное отклонение от исходной формы зеркала; ε — угловое ускорение; S — ширина зеркала, измеренная по оси вращения; E — модуль Юнга зеркального материала; H — толщина зеркала; ρ — плотность материала зеркала.

Применение формулы (2) к X - и Y -зеркалам при их угловом ускорении $\varepsilon=4000$ рад/с² дает значения $\Omega_X=0,57$ нм и $\Omega_Y=4,03$ нм.

Анализ нагруженных состояний выполнен с помощью разностных методов путем построения конечно-элементных моделей (КЭМ). Моделирование проведено с применением программного обеспечения ANSYS (англоязычная версия 14.0.0)*. Расчеты полных деформаций для X -зеркала (рис. 2, а) и Y -зеркала (рис. 2, б), выполненные с применением КЭМ, дают величину деформации в верхних угловых зонах X - и Y -зеркал на уровне $\Omega_{X\text{КЭМ}}=3,3$ нм и $\Omega_{Y\text{КЭМ}}=12,4$ нм.

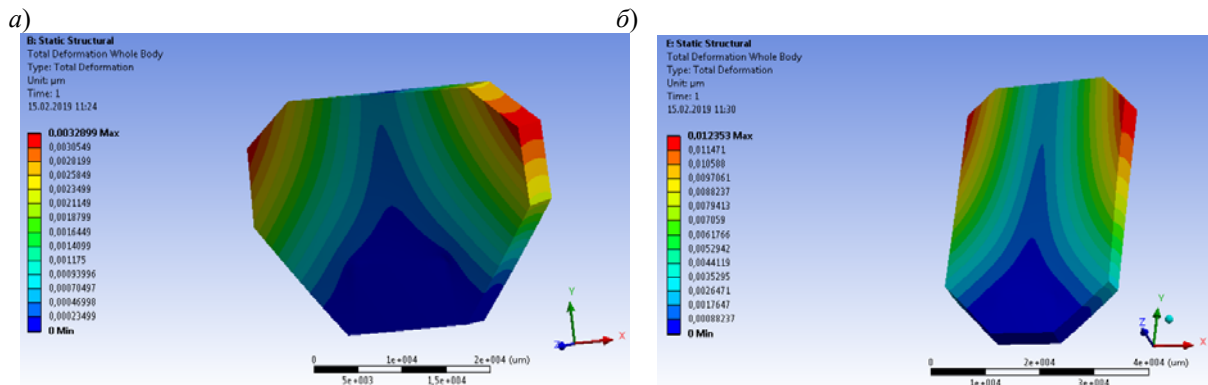


Рис. 2

Как аналитические, так и расчетные оценки показывают незначительные изменения поверхности зеркал при воздействии больших угловых ускорений.

Надежность элементов сканатора. Коллиматор (описание конструкции коллиматора приведено выше). Надежность оптических приборов достаточно высока, так как они, как правило, содержат небольшое количество подвижных элементов, работают с малыми нагрузками в относительно благоприятных условиях и режимах по сравнению, например, с механическими машинами.

Если принять, что вероятность безотказной работы оптических деталей коллиматора по времени τ равна $P_K(\tau)=0,9$, то в предположении об одинаковом вкладе в надежность каждой линзы вероятность их безотказной работы определяется как $P_{\text{л}}(\tau)=\sqrt[3]{P_K(\tau)}=0,965$. Если распределение наработки до отказа у каждой линзы является экспоненциальным $P_{\text{л}}(\tau_0)=\exp(-\lambda_i\tau_0)$ (где время наработки на отказ согласно техническому заданию $\tau_0=8700$ ч), то интенсивность отказов линз оценивается как $\lambda_{\text{л}}=4,1 \cdot 10^{-6}$ ч⁻¹.

Гальвomotor. Главным узлом сканатора являются два гальвomotора, каждый из которых состоит из самостоятельных узлов — бесконтактного электродвигателя постоянного тока [13—19], сканирующего зеркала и датчика угла поворота (ДУП). Сборка ротора гальвomotора содержит в центральной части NdFeB-магнит, который с помощью эпоксидного клея устанавливается в левую и правую части вала ротора. Вал устанавливается в статор из нержавеющей стали на двух радиально-упорных шарикоподшипниках 1106098, посаженных на вал

* Расчеты проведены науч. сотрудником Д. А. Ягнятинским, НПО „ЛУЧ“.

с натягом. Обмотка статора выполнена из медного провода в лаковой изоляции диаметром 0,3 мм, количество витков $N=75$. Сопротивление обмотки статора $\Theta_{об} \sim 2,2$ Ом, индуктивность $L_{об} = 550$ мкГн. Гальвомотор в совокупности с платой управления являются исполнительными элементами контура системы автоматического управления положением зеркала. ДУП входит в контур управления, сигнал с него поступает на усилитель и далее на контроллер гальвомотора.

Надежность сканатора определяется надежностью гальвомотора, а более конкретно — надежностью электродвигателя и шарикоподшипников. Бесконтактные электродвигатели характеризуются повышенной надежностью вследствие отсутствия скользящего контакта и обмотки возбуждения [8, 9, 10—12]. Наибольшее число отказов электродвигателей приходится на обмотки и подшипниковые узлы. Отказы обмоток обусловлены короткими замыканиями между витками или на корпус, обрывом проводов или нарушением мест паяк. Повреждение подшипниковых узлов происходит вследствие механического износа подшипников, ухудшения состояния смазки, некачественной посадки подшипников на вал. Преобладающим видом износа подшипника, вызванного контактной усталостью рабочих поверхностей, является выкрашивание из них металла в виде мелких фрагментов, а также отслоение частичек металла. Более 80 % подшипников качения выходят из строя вследствие разрушений усталостного характера. Подшипники качения весьма чувствительны к перегрузкам. При увеличении нагрузки на подшипник вдвое его долговечность уменьшается примерно в десять раз. Слабая посадка подшипника на вал ведет к проворачиванию внутреннего кольца, что сопровождается контактной коррозией, износом вала, повышением температуры подшипникового узла [2].

Периодические высокочастотные непрерывные небольшие движения, обычно под углом менее 1 или 2°, вызывают быстрый катастрофический отказ, что известно как „ложная коррозия“ — бринеллирование (т.е. образование вмятин на поверхностях качения подшипников) или „коррозия при истирании“ [2].

Зависимость между суммарным расчетным ресурсом L_{ah} (временем наработки до появления признаков усталости) и эквивалентной нагрузкой M определяется выражением

$$L_{ah} = a_1 a_{23} \left((C_r K_k) / M \right)^q \left(10^6 / (60 / \omega) \right) \quad \text{при } M \leq 0,5 C_r, \quad (3)$$

где q — показатель степени: $q=3$ для шарикоподшипников, $q=10/3$ для роликоподшипников; C_r — динамическая грузоподъемность, которую подшипник может выдержать в течение 1 млн оборотов при вероятности безотказной работы 90 %; a_1 и a_{23} — коэффициенты: коэффициент $a_1=1$ для надежности 90 % (для подшипников с гарантированным ресурсом), коэффициент a_{23} учитывает качество монтажа, условий эксплуатации и смазывания и для обычных (нормальных) условий эксплуатации для шарикоподшипников равен $a_{23}=0,7 \dots 0,8$; K_k — коэффициент, выбираемый в зависимости от класса точности подшипника: класс точности „0“ — $K_k=1,0$, „6“ — $K_k=1,05$, „5“ — $K_k=1,1$; ω — рабочая частота вращения подшипника.

Динамическая радиальная грузоподъемность радиальных и радиально-упорных шариковых подшипников вычисляется по формуле (ГОСТ 18855-2013)

$$C_r = b_m f_c (i \cos \beta)^{0,7} Z^{2/3} D_w^{1,8}, \quad (4)$$

где D_w — диаметр шарика; $b_m=1,3$; f_c — параметр, зависящий от отношения $D_w \cos \beta / D_{pw}$, D_{pw} — диаметр окружности центров набора шариков или роликов; β — номинальный угол контакта подшипника (для шарикоподшипника 1006098 угол $\beta=12^\circ$); i — число рядов шариков в подшипнике (для рассматриваемого случая $i=1$); Z — число шариков или роликов в однорядном подшипнике.

Тогда

$$C_r = 1,3 \cdot 59,3 \cdot (1 \cdot \cos 12^\circ)^{0,7} \cdot 20^{0,66} \cdot 2^{1,8} = 1944 \text{ Н},$$

$$L_{ah} = 1 \cdot 0,75 \cdot ((2000 \cdot 1,0) / 0,37)^3 \cdot (10^6 / (60 / (5,6))) = 1,1 \cdot 10^{16} \text{ ч}.$$

Полученные оценки показывают, что со стороны шарикоподшипников заданные показатели надежности обеспечиваются.

В разработанном гальвомоторе использован оптический ДУП в капсульном исполнении, т.е. изготавливаемый в единой конструкции с исполнительным механизмом. Подвижная часть датчика, закрепленная на вращающемся валу, изготовлена из текстолита диаметром 47 мм, толщиной 1,5 мм и имеет момент инерции $3,9 \cdot 10^{-7}$ кг·м² (3,9 г·см²).

Показателями безотказности ДУП являются время средней наработки на отказ (τ_0) или средней наработки до отказа (τ_{cp}). Минимально допустимые значения $\tau_0(\tau_{cp})$, в часах для преобразователей определяются по формуле

$$\tau_0(\tau_{cp}) = 15B \cdot 10^3, \quad B = (1 + \sqrt{B_T}) / (3 + \sqrt{\Psi}), \quad (5)$$

где B_T — коэффициент, численно равный порядковому номеру класса точности для преобразователя ДУП от 1 до 10 ($B_T=0,5$ для преобразователей класса 001, 01); $\Psi=0$ для угловых перемещений; оценки применительно к рассматриваемым условиям дают $\tau_0(\tau_{cp})=8535$ ч.

Отказом ДУП следует считать прекращение функционирования или увеличение погрешности при нормальной температуре более чем в два раза относительно номинального значения.

Сканирующие зеркала изготовлены из монокристаллического кремния, имеют толщину 4 мм. Заявленные в конструкторской документации и реализованные на практике характеристики зеркал:

— вес: X-зеркало — 7,2 г (в сборе с оправкой 11 г), Y-зеркало — 13,5 г (в сборе с оправкой 22 г);

— момент инерции: X-зеркало — 3,92 г·см², Y-зеркало — 8,45 г·см².

Зеркала установлены в алюминиевые оправки по трем поверхностям (торец, задняя и передняя поверхности) с помощью эпоксидного клея. Зеркала имеют отражающее и защитное покрытия. Держатели с зеркалами с помощью прихватов крепятся к валу мотора винтами.

Зеркало должно быть установлено как можно ближе к передней опоре гальвомотора, чтобы снизить поперечные резонансы. Все моменты инерции относительно оси вращения должны быть сбалансированы для минимизации колебаний, вызванных угловым ускорением и возмущениями окружающей среды. Одно из последствий несовпадения зеркальных осей — ошибка позиционирования пучка, часто выражаемая как „улыбка“ или „хмурый взгляд“ [2]. Крепление зеркал зажимами обеспечивает возможность изменения их положения и возможного удаления для замены. Способы установки зеркал как одно целое с креплением и валом являются неразъемными.

В сканирующем зеркале особое внимание должно быть уделено отражательной способности, балансировке, термической и динамической деформации, монтажу. Состояние зеркала колеблющегося сканера касается той части его движения, в которой передаются оптические данные. Теплопроводность становится проблемой при использовании мощных лазеров. Основное требование к сканирующему зеркалу — минимальная масса при минимальном моменте инерции.

Согласно проведенным тепловым и прочностным расчетам (см. выше), сканирующие зеркала не теряют своей работоспособности.

Модель сканатора и оценка показателей надежности. Оптическая система сканатора, повторим, содержит четыре последовательно соединенных узла: коллиматор, X- и Y- сканирующие зеркала, F-theta-объектив. X- и Y- зеркала закреплены на валах приводящих их в действие гальвомоторов. Гальвомоторы контуров управления работают в наиболее напряженных режимах и представляют собой невосстанавливаемые объекты. Для невосстанавливаемых систем основными показателями безотказности являются: время наработки до отказа, вероятность отказа и вероятность безотказной работы, интенсивность отказа. Для электромашин

малой мощности с системой автоматического регулирования показателем является интенсивность отказов λ [8, 9]. Продолжительность работы по времени τ электромеханического устройства можно разбить на три составляющие: приработка узлов, нормальная работа, старение.

Структурная схема контура управления положением сканирующих зеркал представлена на рис. 3. Контур управления содержит: систему оптического тракта (СОТ, рассматривается лишь для общности модели), ДУП, контроллер (К), блок усилительный (БУ), ГМ_X, ГМ_Y — гальвомоторы по осям X и Y . Можно обоснованно утверждать, что с помощью принятых конструктивных решений удалось снизить удельные тепловые нагрузки на оптику до приемлемых величин, при которых ресурсный отказ оптических элементов маловероятен.

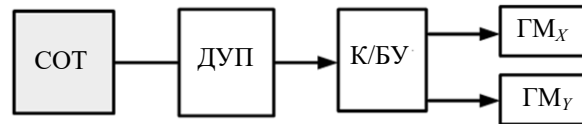


Рис. 3

Так как гальвомоторы в составе управляющего контура работают параллельно, и о взаимном влиянии элементов системы на ее надежность ничего неизвестно, то для рассмотрения можно принять модель с последовательным соединением независимых элементов [7], в которой (как упоминалось выше) отказ одного из элементов 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 время случайной наработки до отказа $\tau_{\text{сл}}$ определяется минимальным значением случайных наработок $\tau_{\text{сл}}(i)$ ее элементов:

$$\tau_{\text{сл}} = \min_{1 \leq i \leq m} \tau_{\text{сл}}(i), \quad (6)$$

где m — число последовательных элементов (в данном случае $m = 3$).

При известных распределениях наработок до отказа отдельных независимых элементов вероятность $P_i(\tau)$ того, что объект проработает безотказно в течение заданного времени τ_0 , начав работать в момент $\tau=0$, или вероятность $P(\tau_0)$ того, что наработка до отказа окажется больше заданного времени τ_0 , определяется по формуле

$$P(\tau_0) = \prod_{i=1}^m P_i(\tau_0). \quad (7)$$

Если распределение наработки до отказа для каждого элемента является экспоненциальным $P_i(\tau_0) = \exp(-\lambda_i \tau_0)$, то показатели надежности такой системы для точных выражений определяются как [5]

$$P(\tau_0) = \exp(-\Lambda \tau_0), \quad (8)$$

а для приближенных выражений (при условии $\Lambda \tau_0 \ll 1$) — как $P(\tau_0) = 1 - \Lambda \tau_0$, где $\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$,

λ_i — интенсивность отказов i -го элемента.

Надежность электронной аппаратуры (ДУП, К и БУ) гораздо выше надежности электромеханических устройств (гальвомоторы), поэтому обоснованно полагаем, что надежность системы определяется надежностью гальвомотора, а более конкретно — надежностью используемых шарикоподшипников (см. выше).

Для спроектированного гальвомотора интенсивность отказов при вероятности его безотказной работы, равной 0,9, и времени наработки до отказа $\tau_0=8700$ ч оценивается по формуле (8): $\lambda = -\ln P(\tau)/\tau_0 = -\ln(0,9)/8700 = 1,21 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. По упрощенной формуле $\lambda = (1 - P(\tau))/\tau_0 = (1 - 0,9)/8700 = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. Видно, что погрешность расчета по упрощенной формуле не превышает 5%.

Определим вероятность безотказной работы гальвомотора с дополнительными нагрузками (зеркало, датчик). Полагая вероятности безотказной работы коллиматора P_K и F-theta-объектива P_F равными: $P_K=P_F=0,995$ (при этом вероятность безотказной работы каждой из линз коллиматора и объектива должна быть на уровне 0,998—0,999), определим вероятность безотказной работы гальвомоторов $P_{ХГМ}=P_{УГМ}=P_{ГМ}=0,9535$. Полагая вероятности безотказной работы зеркала P_3 , датчика P_d и статора $P_{ст}$ равными $P_3=P_d=P_{ст}=0,995$, а постоянного магнита — $P_M=0,99$, определим вероятность безотказной работы подшипникового узла гальвомоторов $P_{п.у}=0,978$. При этом интенсивности отказов зеркала λ_3 , датчика λ_d и статора $\lambda_{ст}$ равны $\lambda_3=\lambda_d=\lambda_{ст}=5,76 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, постоянного магнита $\lambda_M=1,155 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, подшипникового узла $\lambda_{п.у}=2,59 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, а гальвомотора в сборе $\Lambda_{ГМ}=\sum \lambda_i=5,433 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Можно заметить, что при последовательном соединении узлов надежность системы всегда ниже надежности самого ненадежного элемента.

Рассмотрим оборудование сканатора как набор самостоятельных узлов, вероятность безотказной работы каждого из которых в течение ресурсного срока (8700 ч) равна $P=0,9$. Тогда вероятность безотказной работы каждой из линз коллиматора должна быть не ниже $P_{л} = \sqrt[3]{P} = \sqrt[3]{0,9} = 0,965$ ($\lambda_{л}=4,04 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), а F-theta-объектива — $P_{д} = \sqrt[4]{P} = \sqrt[4]{0,9} = 0,974$ ($\lambda_{д}=3,03 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$). Полагая $P_3=P_d=P_{ст}=P_M=0,985$ ($\lambda_i=1,74 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), определим вероятность $P_{п.у}=P/P_{д}^4 = 0,9/0,985^4 = 0,956$ ($\lambda_{п.у}=5,16 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$). Интенсивность отказов гальвомотора в сборе $\Lambda_{ГМ}=\sum \lambda_i = -\ln P/\tau_0 = -\ln 0,9/8700 = 12,11 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Расчет показателей надежности контроллера гальвомотора. В системе автоматического регулирования гальвомотора используется электронная плата контроллера с входящими в нее радиоэлектронными устройствами (РЭУ) в виде электронного модуля (печатного узла). Интенсивность отказов РЭУ Λ_M определяется суммой прогнозируемых значений эксплуатационных интенсивностей отказов элементов $\lambda_{эi}$ [20]:

$$\Lambda_M = \sum_{i=0}^G \lambda_{эi}, \quad (9)$$

где $\lambda_{эi}$ — эксплуатационная интенсивность отказов i -го элемента (компонента), определяемая с учетом его электрического режима, условий работы в составе РЭУ, конструкторско-технологических, функциональных и других особенностей; G — количество элементов (компонентов) в модуле.

Интенсивность отказов отдельных элементов может быть найдена как по данным, предоставляемым производителями, так и определена расчетно. Предварительно были оценены интенсивности отказов элементов, входящих в электрическую схему РЭУ*: конденсаторов, резисторов, интегральных микросхем, диодов и пр. Расчетная интенсивность отказов составила $\Lambda_M=56,262 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, время наработки до отказа $\tau=1/\Lambda_M=17773 \text{ ч}$.

Результаты испытаний элементов сканатора. В процессе отработки конструкции сканатора были проведены следующие испытания: 1) измерение жесткости пружинных колец, поджимающих оптические сборки коллиматора и F-theta-объектива; 2) определение формы оптической поверхности сканирующих зеркал после нанесения отражающего покрытия.

Данные о жесткости пружины необходимы для проведения оценочных расчетов предварительной нагрузки на линзы при сборке и определения моментов закручивания резьбовых колец, обеспечивающих требуемую сборочную нагрузку. Измерения были проведены на испытательной универсальной машине Inspekt Table 5 с диапазоном изменения усилия нагрузки от 0,02 до 5,00 кН и пределом допускаемой относительной погрешности измерений силы $\pm 1\%$. Пружинные кольца нагружались усилием 50 Н несколько раз. Всего были испытаны

* Оценки произведены канд. техн. наук С. Н. Лепешкиным, вед. инженером НПО „ЛУЧ“.

4 пружины, по две для коллиматора и F-theta-объектива. Жесткость пружинного кольца коллиматора составила 5,1 Н/м, жесткость пружинного кольца F-theta-объектива — 2,15 Н/м.

Контроль формы оптических поверхностей сканирующих зеркал проводился на стенде оптических измерений с использованием интерферометра ФТИ-100 с целью установления искажений поверхности. По полученным интерферограммам оптической поверхности искажения составили: максимальный размах — 0,1 мкм для X-зеркала, 0,11 мкм для Y-зеркала, среднеквадратичные отклонения — 0,023 для X- и Y-зеркал. Согласно результатам измерений, искажения формы сканирующих зеркал в расчетных областях расположения пятен лазерной нагрузки не превышают величин, заданных при проектировании.

Заключение. Проведен анализ функциональных требований к сканатору в соответствии с техническим заданием. Для выполнения требований и уменьшения рисков преждевременных отказов оборудования приняты следующие решения, заложенные в конструкторскую документацию и реализованные на практике в опытном образце изготовленного сканатора:

— диаметральные размеры линз увеличены до размеров, гарантирующих беспрепятственное прохождение формируемого лазерного пучка;

— на линзы коллиматора и F-theta-объектива предусмотрено нанесение прочных просветляющих покрытий, гарантирующих безотражательное прохождение лазерного пучка;

— сканирующие зеркала изготовлены из монокристаллического кремния, обладающего высокими прочностными и теплофизическими свойствами; нанесенное отражающее покрытие гарантирует небольшой разогрев зеркала;

— внутрикорпусные тепловыделяющие элементы сканирующей головки имеют надежный тепловой контакт с корпусом, а нанесение на боковые стенки корпуса ребер охлаждения гарантирует низкий перегрев в процессе работы;

— изготовленный гальвомотор с моментным электродвигателем постоянного тока управляется собственным контроллером, который обеспечивает высокий КПД (на уровне 90—95 %) и гарантирует малые тепловые потери и разогрев конструкции.

Результаты испытаний разработанного сканатора подтвердили его работоспособность и надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yoder P. R., Jr., Vukobratovich D. Opto-Mechanical Systems Design. CRC Press, 2015. 867 p.
2. Handbook of Optical and Laser Scanning / Ed. G. F. Marshall and G. E. Stutz. CRC Press: Taylor & Francis Group, LLC, 2012. 789 p.
3. <https://www.cambridgetechnology.com/>
4. <https://www.scanlab.de/>
5. <https://www.raylase.de/>
6. <http://sino-galvo.com/>
7. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. И. А. Ушакова М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
8. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин: Учеб. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2006. 432 с.
9. Гольдберг О. Д., Хелемская С. П. Надежность электрических машин. М.: Изд. центр „Академия“, 2010. 288 с.
10. Столов Л. И., Афанасьев А. Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989. 224 с.
11. Гридин В. М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 2. С. 75—86.
12. Гридин В. М. Бесконтактный двигатель постоянного тока с коммутацией обмотки двумя транзисторами // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 54—63. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-54-63.

13. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
14. Осин И. Л., Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Изд. дом МЭИ, 2003. 424 с.
15. Баранов М. В., Бродовский В. Н., Зимин А. В., Каржавов Б. Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 240 с.
16. Лифанов В. А. Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов: Учеб. пособие. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. 164 с.
17. Лютаревич А. Г., Долингер С. Ю., Чепурко Н. Ю., Хацевский К. В., Лохман Е. А. Вопросы проектирования электродвигателей постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 1—9 [Электронный ресурс]: <science-education.ru/ru/article/view?id=15250>, 12.08.2022.
18. Овсянников В. Н. Моментный двигатель с ограниченным углом поворота ротора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2014. 180 с.
19. Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Calibration of galvanometric scan heads for additive manufacturing with machine assembly defects consideration // Additive Manufacturing, 2019. N 1. P. 1—10. DOI: 10.1016/j.addma.2019.02.003.
20. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян; Под ред. С. М. Боровикова. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.

Сведения об авторах

- Юрий Иванович Шанин** — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник; НИИ НПО „ЛУЧ“; вед. научный сотрудник; E-mail: ShaninYul@sialuch.ru
- Илья Сергеевич Шаранов** — НИИ НПО „ЛУЧ“; зам. начальника отделения; E-mail: SharapovIS@sialuch.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022; одобрена после рецензирования 11.11.2022; принята к публикации 20.03.2023.

REFERENCES

1. Yoder P.R., jr., and Vukobratovich D. *Opto-Mechanical Systems Design*, CRC Press, 2015, 867 p.
2. Marshall G.F. and Stutz G.E., ed., *Handbook of Optical and Laser Scanning*, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2012, 789 p.
3. <https://www.cambridgetechnology.com/>.
4. <https://www.scanlab.de/>.
5. <https://www.raylase.de/>.
6. <http://sino-galvo.com/>.
7. Ushakov I.A., ed., *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. Spravochnik* (Reliability of Technical Systems. Handbook), Moscow, 1985, 608 p. (in Russ.)
8. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* (Reliability of Electrical Machines), Moscow, 2006, 432 p. (in Russ.)
9. Gol'dberg O.D., Khelemskaya S.P. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* (Reliability of Electrical Machines), Moscow, 2010, 288 p. (in Russ.)
10. Stolov L.I., Afanas'yev A.Yu. *Momentnyye dvigateli postoyannogo toka* (DC Torque Motors), Moscow, 1989, 224 p. (in Russ.)
11. Gridin V.M. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2011, no. 2, pp. 75–86. (in Russ.)
12. Gridin V.M. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2017, no. 4, pp. 54–63, DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-54-63. (in Russ.)
13. Kenjo T., Nagamori Sh. *Permanent-magnet and brushless DC motors*, Oxford, 1985.
14. Osin I.L., Yuferov F.M. *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv* (Electric Machines of Automatic Devices), Moscow, 2003, 424 p. (in Russ.)
15. Baranov M.V., Brodovskiy V.N., Zimin A.V., Karzhavov B.N. *Elektricheskiye sledyashchiye privody s momentnym upravleniyem ispolnitel'nymi dvigatelyami* (Electric Servo Drives with Torque Control of Actuating Motors), Moscow, 2006, 240 p. (in Russ.)
16. Lifanov V.A. *Raschet elektricheskikh mashin maloy moshchnosti s vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov* (Calculation of Electric Machines of Low Power with Excitation from Permanent Magnets), Chelyabinsk, 2010, 164 p. (in Russ.)
17. science-education.ru/ru/article/view?id=15250. (in Russ.)
18. Ovsyannikov V.N. *Momentnyy dvigatel' s ogranichennym uglom povorota rotora* (Torque Motor with Limited Rotor Angle), Candidate's Thesis, Samara, 2014, 180 p. (in Russ.)

19. Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. *Additive Manufacturing*, 2019, no. 1, pp. 1–10, DOI: 10.1016/j.addma.2019.02.003.
20. Borovikov S.M., Tsyrel'chuk I.N., Troyan F.D. *Raschot pokazateley nadozhnosti radioelektronnykh sredstv* (Calculation of Indicators of Reliability of Radio Electronic Means), Minsk, 2010, 68 p. (in Russ.)

Data on authors

- Yuriy I. Shanin** — PhD, Senior Scientist; RDI SPA “LUCH”; Leading Researcher;
E-mail: ShaninYul@sialuch.ru
- Ilya S. Sharapov** — RDI SPA “LUCH”, Deputy Head of Department; E-mail: SharapovIS@sialuch.ru

Received 05.09.2022; approved after reviewing 11.11.2022; accepted for publication 20.03.2023.