

СИСТЕМА ДВУХКООРДИНАТНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕРКАЛА ЛАЗЕРНОГО РЕЗОНАТОРА

Н.Н. Терсков

terskovnn@student.bmstu.ru

SPIN-код: 8105-6521

В.Р. Гаврин

gavrinvr@student.bmstu.ru

SPIN-код: 9377-9322

В.В. Сабиров

sabirovvv@student.bmstu.ru

SPIN-код: 4036-6549

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработана система автоматического двухкоординатного позиционирования зеркала, которая в программно-аппаратном комплексе может быть использована для юстировки и поднастройки лазера. Аппаратная часть построена на основе электродвигательных приводов, микроконтроллера и портативного измерителя мощности с тепловым датчиком. Программная часть написана на языке программирования Python, в основе алгоритма которой лежит аппроксимация экспериментальных данных функцией Гаусса с помощью метода наименьших квадратов. Для практической реализации системы создан лабораторный стенд. Предлагаемая система может быть использована в качестве более быстрой и точной замены системы ручной юстировки и поднастройки лазерных установок.

Ключевые слова

Юстировка, лазер, мощность лазера, двигатель, микроконтроллер, позиционирование, метод наименьших квадратов, аппроксимация, Python, функция Гаусса

Поступила в редакцию 27.05.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Изготовление качественных изделий или точное проведение экспериментов с помощью лазера возможно только при согласованной работе всех систем лазерного станка (установки). Поэтому при работе с такими установками рекомендуется проводить их юстировку, а в некоторых случаях юстировка является обязательной. Как правило, лазерные резонаторы различных лабораторных установок юстируют вручную, что приводит к большим временным издержкам в процессе экспериментальных исследований, при этом погрешность позиционирования зеркала при ручной юстировке сильно ограничена снизу. Также ручная юстировка требует непосредственного доступа к лабораторной установке, что на практике бывает затруднительным. Вдобавок к этому данная процедура может быть травмоопасной.

Целью данной работы является разработка системы автоматического двухкоординатного позиционирования зеркала, которую в программно-аппаратном

комплексе можно будет использовать для юстировки и поднастройки лазера. Для достижения цели необходимо изучить само понятие юстировки, создать аппаратную и программную часть комплекса, совместить их на лабораторном стенде.

Юстировка лазерных установок. Юстировка лазерной установки — процедура настройки прибора, от которой зависит точность работы. Данную процедуру следует проводить регулярно, поскольку, например, в процессе работы лазера могут выделяться газообразные вещества, часть которых остается на зеркальной поверхности [1]. Вследствие этого геометрическая форма отражаемых лучей искажается.

При настройке лазерной установки зеркала регулируют так, чтобы лазерный луч попадал на рабочую поверхность перпендикулярно, под углом 90° . Пример расположения зеркал на лазерной установке, подлежащей юстировке, представлен на рис. 1. Процедура начинается с первого зеркала, продолжается на втором и завершается на третьем. При настройке первых двух зеркал луч не обязательно должен попадать в цент зеркала, при настройке третьего оптического узла необходимо, чтобы луч отражался строго от центра. Это необходимо для вхождения луча в линзу по вертикали относительно плоскости рабочей поверхности.

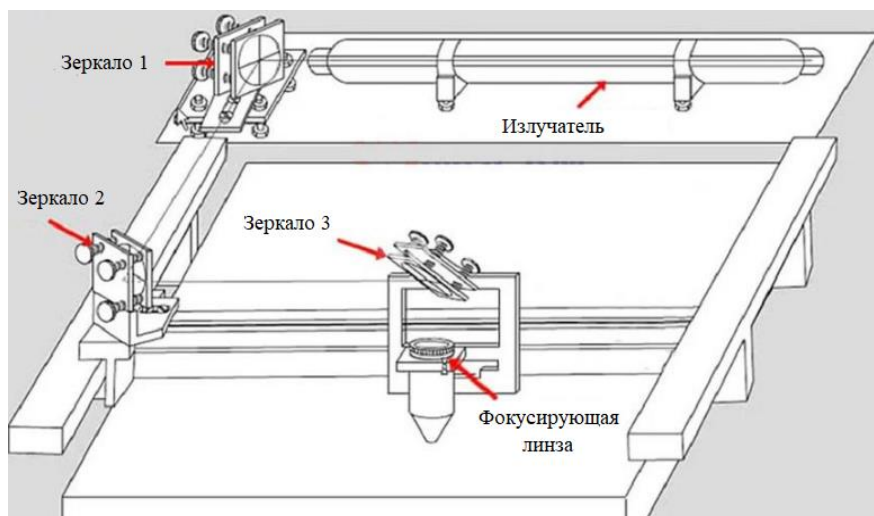


Рис. 1. Пример расположения зеркал при юстировке

Аппаратная часть системы. Система автоматического двухкоординатного позиционирования, рассматриваемая в данной работе, используется для регулировки положения одного из зеркал лазерной установки. Расположение такой системы на необходимом количестве зеркал позволяет полностью автоматизировать процесс юстировки уже всей установки. Для регулирования положения одного зеркала собран специальный стенд (рис. 2). Структурная схема данной системы представлена на рис. 3.

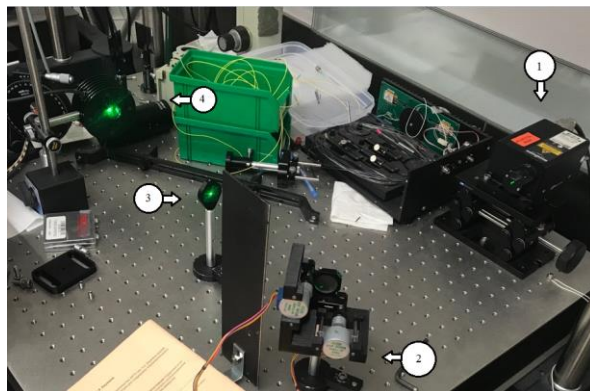


Рис.2. Стенд автоматического двухкоординатного позиционирования зеркала:
 1 — источник излучения; 2 — система регулирования положения зеркала; 3 — диафрагма;
 4 — тепловой датчик мощности

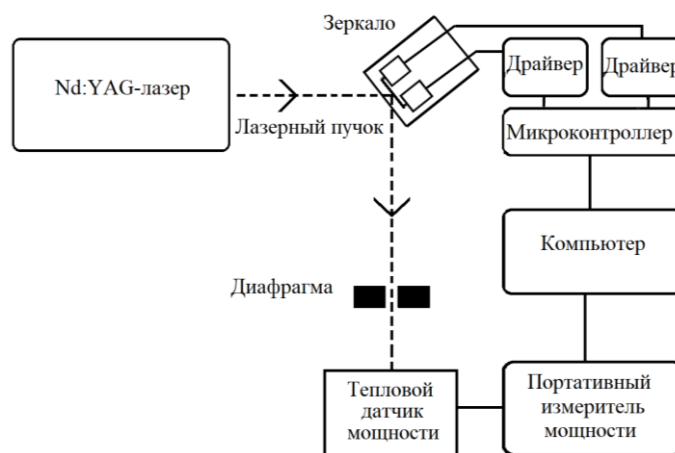


Рис. 3. Структурная схема системы

В качестве источника излучения используется Nd:YAG-лазер, работающий в режиме генерации второй оптической гармоники на длине волны 532 нм. Пучок лазера падает на юстируемое зеркало, вращение которого вокруг двух осей регулируется двумя четырехфазными однополярными шаговыми двигателями через передачу винт — гайка и систему креплений, модель которых представлена на рис. 4 [2]. В основе данной системы лежит крепление зеркала с винтами, обладающими малым шагом, а также система креплений и направляющих двигателей. Для изготовления креплений и направляющих была создана трехмерная модель, которая была напечатана на 3D-принтере [3]. Количество шагов ротора самого двигателя — 64, а коэффициент редукции для внутреннего редуктора составляет по документации 1/63,68395. Это означает, что угол одного шага выходного вала двигателя равен примерно $0,0883^\circ$. Использование передачи винт — гайка позволяет получить поворот зеркала на $0,5^\circ$ при повороте вала двигателя на один полный оборот. Данные двигатели могут вращаться в обоих

направлениях в пределах требуемого угла и хорошо подходят для механических систем точного позиционирования [4]. Управление двигателями осуществляется с помощью управляющих модулей (драйверов) и микроконтроллера цифровым способом через СОМ-порт компьютера [5]. Питание на двигатели подается через микроконтроллер, питание которого, в свою очередь, осуществляется от компьютера пользователя по USB-порту.

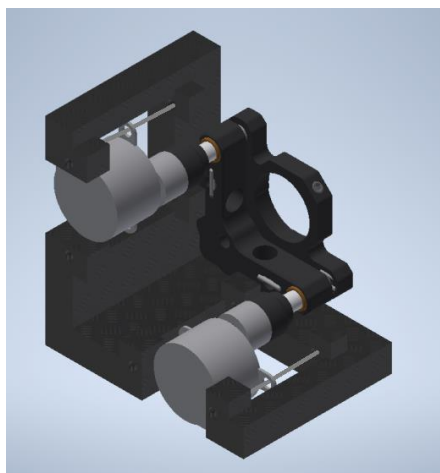


Рис. 4. 3D-модель системы передачи вращения от двигателей к зеркалу

Для контроля совпадения пути прохождения лазерного пучка с положением оптической оси системы, соосно с оптической осью была добавлена диафрагма [6]. Обратная связь по мощности реализуется с помощью теплового датчика, на который попадает лазерный пучок, отраженный от зеркала и прошедший через диафрагму [7]. Портативный измеритель мощности обеспечивает считывание данных с датчика по протоколу RS-232 [8]. Полученные данные измеритель мощности передает также по этому протоколу. Для взаимодействия с компьютером используется адаптер RS-232 — USB.

Далее передача этих данных происходит также через СОМ-порт. Функциональная схема системы представлена на рис. 5.

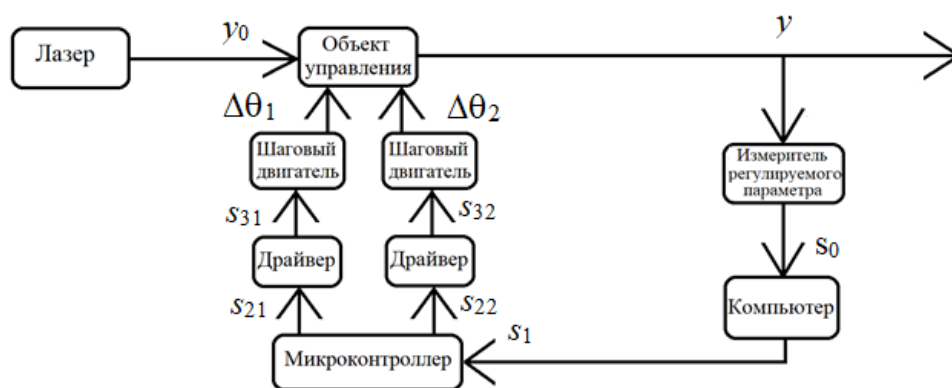


Рис. 5. Функциональная схема системы:

y_0 — значение выходной мощности лазера; y — действительное значение мощности, снимаемое измерителем; s_0 — значение мощности, считанное измерителем и отправленное на компьютер; s_1 — команда, поступающая на микроконтроллер с информацией о значении угла поворота вала определенного двигателя; s_{21} , s_{22} — команда поступающая на соответствующий драйвер двигателя с указанием угла поворота; s_{31} , s_{32} — команда соответствующему двигателю, согласно таблице коммутации; $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ — угол поворота, сообщаемый соответствующему зеркалу с помощью двигателей

Программная часть системы. С помощью программы, написанной на языке Python, микроконтроллеру подается команда на вращение вала определенного двигателя на определенный угол и считывается значение с измерителя мощности [9]. На основании полученного значения происходит дальнейшая работа алгоритма.

Путем последовательного управления двумя двигателями зеркало устанавливается в угловое положение, соответствующее максимальной мощности лазерного пучка. При вращении вала одного из двигателей происходит изменение положения зеркала по оси X , а далее, при вращении вала другого двигателя, — по оси Y . Значения мощности лазера фиксируют при стационарном положении зеркала, а не в момент поворота вала двигателя.

Выполнение алгоритма начинается с определения направления вращения двигателей в сторону увеличения мощности. В окрестности начального положения зеркала снимают ряд значений мощности лазерного пучка: два слева от начального положения и два справа. Выбор количества считываемых точек обусловлен тем, что полученные данные обладают погрешностью, ввиду чего необходимы дополнительные точки для снижения роли возмущающих воздействий на обработку данных.

После оценки и выбора направления вращения осуществляют считывание экспериментальных данных значений мощности с выбранным шагом и захватом нескольких точек после прохождения максимума. Выбранный шаг и количество данных точек определяются требуемым уровнем точности. Полученный набор экспериментальных данных аппроксимируется согласно методу наименьших квадратов функцией Гаусса. Функция Гаусса применима ввиду того, что распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка является гауссовым [10]. Захват нескольких точек после прохождения максимума позволяет увеличить точность аппроксимации.

Уравнение функции Гаусса с оптимальными значениями b_0 , b_1 , b_2 представлено ниже:

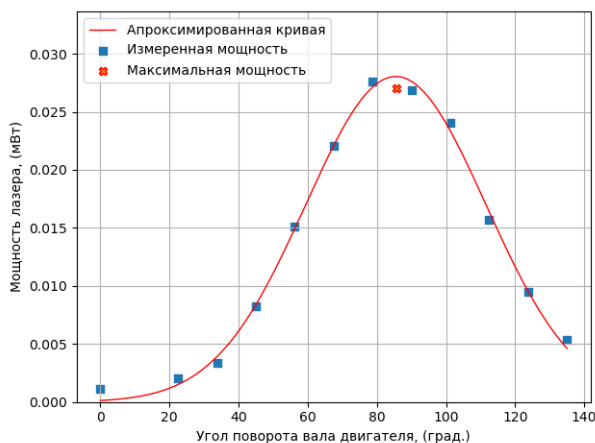
$$y = f(x) = b_0 \exp\left(-\frac{((x + b_1)/b_2)^2}{2}\right).$$

Задача сводится к поиску таких коэффициентов b_0 , b_1 , b_2 , при которых сумма квадратов отклонений будет наименьшей. Ниже приведено математическое пояснение задачи:

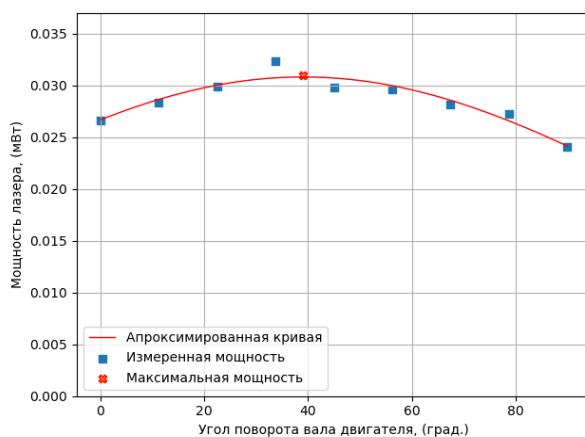
$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 = \sum_{i=1}^n \left(y_i - b_0 \exp\left(-\frac{((x + b_1)/b_2)^2}{2}\right) \right)^2 \rightarrow \min_{x_i}.$$

После аппроксимации экспериментальных данных функцией Гаусса зеркало устанавливают в положение максимума аппроксимированной кривой. В этом положении дополнительно измеряют мощность лазера.

Далее аналогично настраивают положение зеркала по второй оси. Графическое пояснение работы алгоритма на примере настройки положения зеркала лабораторного стенда показано на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Регулирование положения зеркала по оси X (а) и Y (б)

При необходимости более точного позиционирования можно запустить алгоритм повторно со значительно уменьшенным шагом или измерить мощность в окрестности полученного максимума и подкорректировать положение зеркала.

Время выполнения алгоритма в основном определяется временем считывания значения мощности тепловым датчиком. Это время по документации для данного датчика составляет около 1,8 с. Этот показатель можно уменьшить, используя вместо теплового датчика мощности другие фотодетекторы, при этом все остальные узлы системы останутся прежними. Суммарное время

установки зеркала в положение, соответствующее максимальной мощности лазера, может занимать несколько десятков секунд в зависимости от точности и количества полученных значений для аппроксимации. Данный показатель существенно меньше, чем время, требуемое на ручную подобную настройку, которая может длиться несколько часов и даже дней, а также занимает рабочее время специалиста.

Пользовательский интерфейс системы. Пользовательский интерфейс ручного режима работы программы представлен на рис. 7. Ручной режим позволяет пользователю, выбрав необходимую для регулировки ось, нажав клавишу «Двигатель 1 GO» или «Двигатель 2 GO» и задав число шагов вала двигателя (опционально градусов), «довернуть» луч в заданное положение и увидеть текущее значение мощности в окне «Мощность».

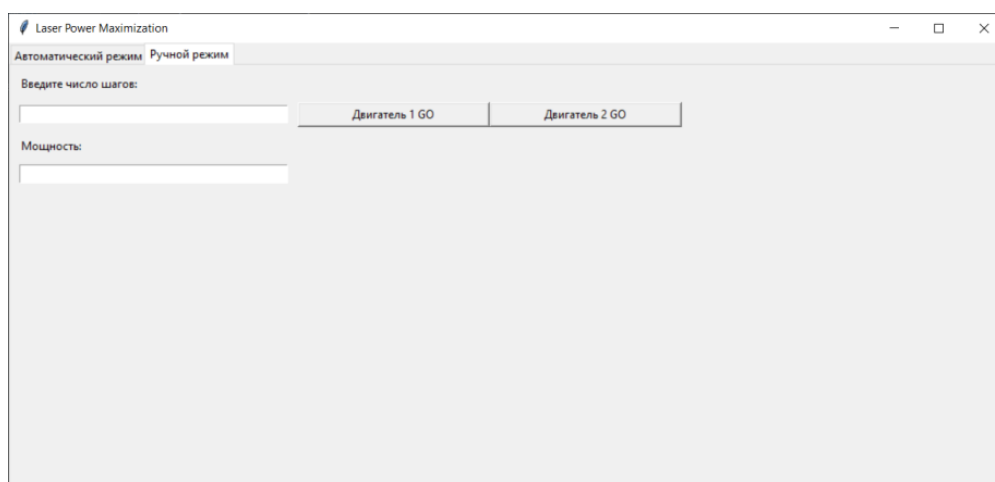


Рис. 7. Пользовательский интерфейс ручного режима

Пользовательский интерфейс автоматического режима работы программы представлен на рис. 8. Данный режим позволяет пользователю кнопкой «Начать работу» запустить алгоритм, описанный выше, и провести юстировку лазерного луча по двум осям. Значения максимальной мощности после выполнения алгоритма пользователь может увидеть в окне «Максимальная мощность». Также пользователю доступны графики для каждого из двигателей, полученные во время работы алгоритма. Если пользователь в окне «Выберите номер двигателя» укажет номер двигателя, то алгоритм юстировки лазерного луча выполнится только для данного двигателя и соответствующей оси.

Таким образом, конечный пользователь получает довольно удобный для работы интерфейс для работы в системе. Также по желанию пользователя имеется возможность добавления в интерфейс других специфических функций. Например, может быть добавлена возможность запуска процедуры юстировки через указанный промежуток времени или при изменении температуры и других факторов на заданное значение.

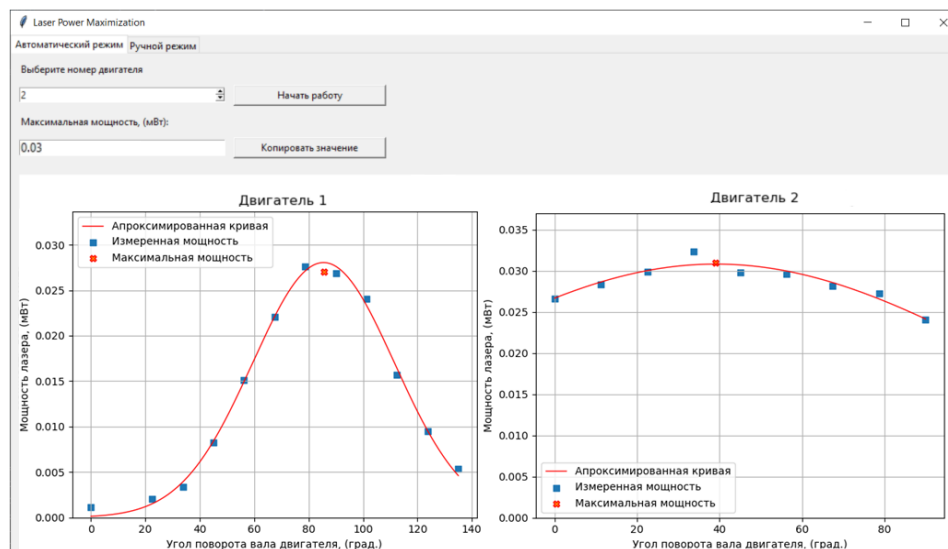


Рис. 8. Пользовательский интерфейс автоматического режима

Выводы. В ходе исследования изучены общие принципы процедуры юстировки лазерных установок. Проведена работа по созданию как аппаратной, так и программной части системы автоматического двухкоординатного позиционирования зеркала лазерного резонатора, которая в комплексе может быть использована для юстировки и поднастройки лазерных установок. Применение данной системы позволяет конечному пользователю удобно, безопасно и более точно выполнять юстировку установок за меньшее по сравнению с ручным способом проведения такой процедуры время.

Литература

- [1] Эрвайс А.В. Юстировка и ремонт оптико-механических измерительных приборов. М., Машгиз, 1958.
- [2] Smooth bore kinematic mirror mounts with two adjusters. *thorlabs.com: веб-сайт*. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1492&pn=KM100 (дата обращения: 11.11.2020).
- [3] Федоренков А.П., Полубинская Л.Г. Autodesk Inventor. Шаг за шагом. М., Эксмо, 2008.
- [4] Кацман М.М. Электрические машины. М., Академия, 2013.
- [5] Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino. СПб., БХВ-Петербург, 2012.
- [6] Неволин В.Н., Менушенков А.П., Петровский В.Н. Физические основы лазерной технологии. М., МИФИ, 2010.
- [7] Vega P/N 7Z01560. *ophiropt.com: веб-сайт*. URL: <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/ru/laser-power-energy-meters/products/smart-displays/vega> (дата обращения: 11.11.2020).
- [8] 3A P/N 7Z02621. *ophiropt.com: веб-сайт*. URL: <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/laser-power-energy-meters/products/Laser-Thermal-Power-Sensors/High-Sensitivity-Thermal-Laser-Sensors/3A> (дата обращения: 11.11.2020).

- [9] Гуриков С.Р. Основы алгоритмизации и программирования на Python. М., Форум, 2018.
- [10] Айвазян С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М., Финансы и статистика, 1983.

Терсков Николай Николаевич — студент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Гаврин Вадим Романович — студент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Сабиров Владислав Валентинович — студент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Лазарев Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Терсков Н.Н., Гаврин В.Р., Сабиров В.В. Система двухкоординатного позиционирования зеркала лазерного резонатора. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 05(58). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-05-701>

SYSTEM FOR TWO-COORDINATE POSITIONING OF THE LASER RESONATOR MIRROR

N.N. Terskov

terskovnn@student.bmstu.ru

SPIN-code: 8105-6521

V.R. Gavrin

gavrinvr@student.bmstu.ru

SPIN-code: 9377-9322

V.V. Sabirov

sabirovvv@student.bmstu.ru

SPIN-code: 4036-6549

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Authors developed a system for automatic two-coordinate positioning of the mirror, which can be used in the hardware-software complex for aligning and tuning the laser. The hardware part is built on the basis of electric motor drives, a microcontroller and a portable power meter with a thermal sensor. The software part is written in the Python programming language, the algorithm is based on the approximation of experimental data by the Gaussian function using the least squares method. A laboratory installation was created for the practical implementation of the system. The proposed system can be used as a faster and more accurate replacement for the manual alignment and adjustment of laser systems.

Keywords

Alignment, laser, laser power, motor, microcontroller, positioning, least squares, approximation, Python, Gaussian function

Received 27.05.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Ervays A.V. Yustirovka i remont optiko-mekhanicheskikh izmeritel'nykh priborov [Adjustment and maintenance of radio-mechanical measurement equipment]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958 (in Russ.).
- [2] Smooth bore kinematic mirror mounts with two adjusters. *thorlabs.com: website*. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1492&pn=KM100 (accessed: 11.11.2020).
- [3] Fedorenkov A.P., Polubinskaya L.G. Autodesk Inventor. Shag za shagom [Autodesk Inventor. Step by step]. Moscow, Eksmo Publ., 2008 (in Russ.).
- [4] Katsman M.M. Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2013 (in Russ.).
- [5] Sommer U. Programirovanie mikrokontrollernykh plat Arduino/Freeduino [Programming of Arduino/Freeduino microcontroller boards]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2012 (in Russ.).
- [6] Nevolin V.N., Menushenkov A.P., Petrovskiy V.N. Fizicheskie osnovy lazernoy tekhnologii [Physical basis of laser technology]. Moscow, NIYaU MIFI Publ., 2010 (in Russ.).
- [7] Vega P/N 7Z01560. *ophiropt.com: website* (in Russ.). URL: <https://www.ophiropt.com/laser-measurement/ru/laser-power-energy-meters/products/smart-displays/vega> (accessed: 11.11.2020).

- [8] 3A P/N 7Z02621. *ophiropt.com: website*. URL: <https://www.ophiropt.com/laser-measurement/laser-power-energy-meters/products/Laser-Thermal-Power-Sensors/High-Sensitivity-Thermal-Laser-Sensors/3A> (accessed: 11.11.2020).
- [9] Gurikov S.R. *Osnovy algoritmizatsii i programmirovaniya na Python [Fundamentals of Python algorithmization and programming]*. Moscow, Forum Publ., 2018 (in Russ.).
- [10] Ayvazyan S.A. *Prikladnaya statistika. Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh [Applied statistics. Modelling essentials and primary data processing]*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983 (in Russ.).

Terskov N.N. — student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Gavrin V.R. — student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Sabirov V.V. — student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Lazarev V.A, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optical-Electronic System, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Terskov N.N., Gavrin V.R., Sabirov V.V. System for two-coordinate positioning of the laser resonator mirror. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal [Politechnical student journal]*, 2021, no. 05(58). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-05-701.html> (in Russ.).