

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.05

УДК 681.51:681

В.Д. ЗагвозкинПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Управление режимами работы лазерного диода традиционно связано с применением ПИ-регуляторов. Однако лазерный диод должен обеспечивать соблюдение ряда технических требований, таких как относительная нестабильность выходной мощности излучения в диапазоне рабочих температур, относительная нестабильность выходной мощности излучения при установившейся температуре, время функциональной готовности после подачи питания. Вышеперечисленные требования определяют качество работы лазерного диода. Для соблюдения технических требований нужна корректная настройка имеющихся регуляторов. Среди эффективных путей решения данной проблемы – построение математической модели системы автоматического управления (САУ) оптической мощностью лазерного диода и настройка параметров регулятора с помощью методов оптимизации. В данном случае для идентификации модели САУ и настройки регулятора целесообразно использовать пакет прикладных программ MatLab. **Цель исследования:** оптимизация регулятора оптической мощности лазерного диода. **Методы:** разработка математической модели системы автоматического управления оптической мощностью лазерного диода, применение MatLab Identification Toolbox для идентификации лазерного диода как объекта управления с помощью экспериментальных данных. **Результаты:** оптимизация регулятора оптической мощности лазерного диода позволила уменьшить время выхода на рабочую мощность и повысить помехоустойчивость. Разработанная математическая модель САУ оптической мощностью лазерного диода подтвердила правильность идентификации. Благодаря оптимизации регулятора оптической мощности лазерного диода САУ удовлетворяет техническим требованиям. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы при разработке САУ оптической мощностью лазерного диода, что позволило уменьшить время функциональной готовности и уменьшить нестабильность выходной мощности излучения лазерного диода.

Ключевые слова: лазерный диод, идентификация, оптимизация, ПИ-регулятор.

V.D. Zagvozhkin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

OPTIMIZATION OF LASER DIODE OPTICAL POWER CONTROLLER

The control of the operating modes of a laser diode is traditionally associated with the use of PI controllers. However, the laser diode must meet a number of technical requirements, such as the relative instability of the output power of radiation in the range of operating temperatures, the relative instability of the output power of radiation at a steady temperature, the time of functional readiness after power-up. The above requirements determine the quality of the laser diode. To comply with the technical requirements, the correct setting of the existing regulators is necessary. One of the effective ways to solve this problem is to build a mathematical model of an automatic control system (ACS) for the optical power of a laser diode and adjust the controller parameters using optimization methods. In this case, it is advisable to use the MatLab application package to identify the ACS model and adjust the controller. **Purpose:** optimization of the laser diode optical power controller. **Methods:** development of a mathematical model of a system for automatically controlling the optical power of a laser diode, using MatLab Identification Toolbox to identify a laser diode as a control object using experimental data. **Results:** optimization of the optical power controller of the laser diode made it possible to reduce the time to reach the operating power and increase the noise immunity. The developed mathematical model of the ACS with the optical power of the laser diode confirmed the correctness of the identification. Thanks to the optimization of the laser diode optical power controller, the ACS satisfies the technical requirements. **Practical relevance:** the results of the research were used in the development of the automatic control system for the optical power of the laser diode, which made it possible to reduce the time of functional readiness and reduce the instability of the output power of the laser diode radiation.

Keywords: laser diode, identification, optimization, PI controller.

Введение

Лазерные диоды применяются в различных областях, таких как передача данных, накачка твердотельных лазеров, спектроскопия и др. [1–3]. Задача эффективной передачи излучения от источника актуальна для волоконно-оптических линий связи в связи с потерями оптической мощности (4–10 дБ) в местах излучения в оптоволокно [4–5].

Имеется множество путей повышения эффективности излучения лазерного диода: согласование мощности излучения с размерами сердцевины оптического волокна, согласование апертуры оптоволокна с диаграммой направленности источника излучения и др. [6–8]. Одним из них является оптимизация регулятора мощности лазерного диода, рассматриваемая в данной статье.

Для оптимизации регулятора лазерного диода должна быть создана модель, которая отражает статические, динамические и стохастические свойства элементов с точки зрения теории автоматического управления [9].

Регулятор оптической мощности лазерного диода САУ должен обеспечивать соблюдение ряда технических требований [10]. Ниже перечислены технические требования к САУ оптической мощностью лазерного диода:

- относительная нестабильность выходной мощности излучения в диапазоне рабочих температур – не более 3 %;
- относительная нестабильность выходной мощности излучения при установившейся температуре – не более 1 %;
- время функциональной готовности после подачи питания – не более 2 с.

На рис. 1 приведена функциональная схема САУ оптической мощностью лазерного диода. Регулятор оптической мощности лазерного диода САУ реализован в микроконтроллере в виде программного кода.

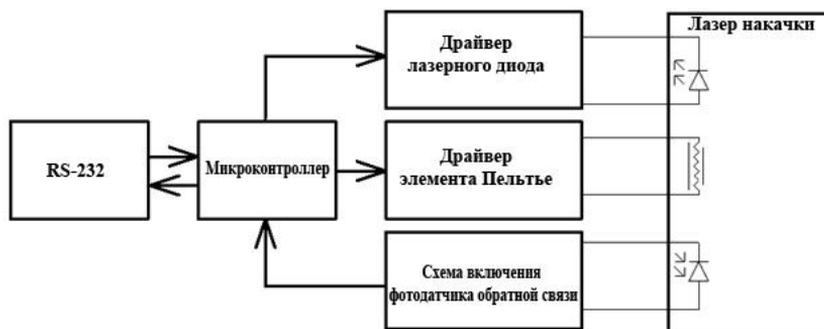


Рис. 1. Функциональная схема САУ оптической мощностью лазерного диода

С.С. Стариков, О.Л. Кель, И.Л. Вольхин в своей работе «Измерение шумов волоконно-оптических источников излучения» [11] перечислили основные источники шумов (рис. 2).

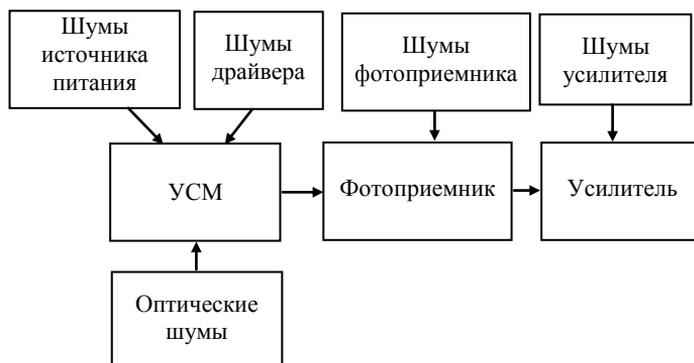


Рис. 2. Основные источники шума

Шумы драйвера зависят от управляющего воздействия, вырабатываемого микроконтроллером (см. рис. 1), т.е. регулятор лазерного диода САУ влияет на шумы драйвера.

Исходя из вышеизложенного, оптимизация регулятора лазерного диода САУ позволит уменьшить время функциональной готовности и уменьшить нестабильность выходной мощности излучения лазерного диода. В связи с этим поставлены следующие задачи:

1. Идентификация лазерного диода как объекта управления с помощью метода интегрирования экспериментальных данных.
2. Построение модели регулятора в MatLab/Simulink.
3. Создание модели САУ оптической мощностью лазерного диода в MatLab/Simulink.
4. Оптимизация коэффициентов регулятора с помощью математических методов.

1. Идентификация объекта управления

Исходная система автоматического управления (САУ) мощностью лазера имеет структуру, представленную на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема САУ мощностью лазера, где « $P_{\text{зад}}$ » – задающее воздействие по мощности; « $P_{\text{тек}}$ » – текущее значение управляемой величины (мощности); « e » – отклонение управляемой величины от задающего воздействия; « V » – сформированное регулятором значение напряжения

Разрываем обратную связь, убираем регулятор, чтобы напрямую подавать управляющее воздействие на лазер для идентификации объекта управления (ОУ), и добавляем фотодатчик с осциллографом (рис. 4).

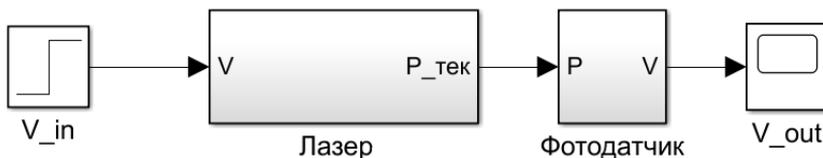


Рис. 4. Структурная схема для идентификации ОУ, где « V_{in} » – напряжение на входе в лазер (ОУ); «Фотодатчик» – преобразователь мощности в напряжение; « V_{out} » – осциллограф

Далее подаем на вход лазера (V_{in}) ступенчатое воздействие, при котором мощность лазера равна 15 мВт, и получаем переходный процесс, представленный на рис. 5.

При обработке данных с осциллограммы нужно снимать вход и выход объекта управления с постоянным шагом по времени.

После обработки результатов переходного процесса, получаем таблицу, представленную ниже.

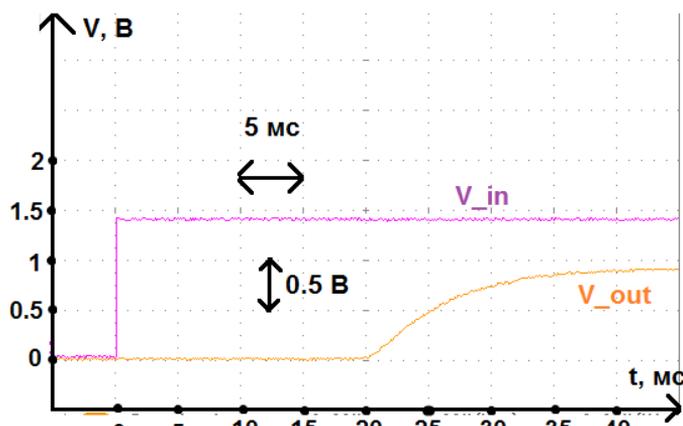


Рис. 5. Реакция объекта управления на ступенчатое воздействие

Реакция объекта управления на ступенчатое воздействие

Время, мс	V_{in} , В	V_{out} , В	Время, мс	V_{in} , В	V_{out} , В
0	1,4	0	31	1,4	0,79
1	1,4	0	32	1,4	0,81
2	1,4	0	33	1,4	0,835
3	1,4	0	34	1,4	0,855
...	35	1,4	0,87
20	1,4	0	36	1,4	0,88
21	1,4	0,125	37	1,4	0,88
22	1,4	0,21	38	1,4	0,88
23	1,4	0,33	39	1,4	0,89
24	1,4	0,43	40	1,4	0,89
25	1,4	0,49	41	1,4	0,89
26	1,4	0,56	42	1,4	0,9
27	1,4	0,625	43	1,4	0,9
28	1,4	0,68	44	1,4	0,9
29	1,4	0,72	45	1,4	0,9
30	1,4	0,75			

Для использования метода интегрирования экспериментальных данных [12] определяем характер переходного процесса, представленного на рис. 5. Исходя из апериодического характера переходного процесса задаем передаточной функцией первого порядка с учетом звена чистого запаздывания [13]. Передаточная функция объекта управления приведена ниже:

$$W(p) = e^{-p\tau} \cdot \frac{K}{Tp+1}. \quad (1)$$

Используя метод интегрирования экспериментальных данных, получаем коэффициенты передаточной функции объекта управления: $K = 0,663$, $\tau = 0,02$, $T = 0,006$.

2. Построение модели регулятора

Структурная схема существующего регулятора представлена на рис. 6.

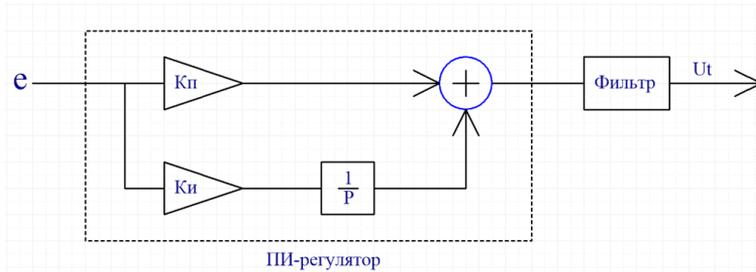


Рис. 6. Регулятор САУ оптической мощностью лазерного диода

```

1  Id power=adc->ase;
2  Id power= REG ASE POWER RESCALE(id power
3  Id power=ase therm compensate(Id power,aux temp);
4  COMMON LABEL:
5  pow ref=REG POW LEVEL;
6  pow p err=(pow ref-Id power)*REG POW P GAIN;
7  pow i_err+=(pow_ref-Id_power)*REG_POW_I_GAIN;
8
9  If(fabs(pow i err)>REG ISAT)
10 {
11   if(pow i err>0.0)
12    pow i err=REG ISAT;
13   else
14    pow i err=-REG ISAT;
15 }
16
17 filter-=filter/REG FILTER;
18 filter+=((pow p err)+(pow i err));
19
20 Id curr ref=filter/REG FILTER;
21
22 if(Id_curr_ref>REG_LD_MAX_CURR)
23 {
24   Id curr ref=REG_LD_MAX_CURR;
25 }
26 Else if(Id_curr_ref<0)
27 {
28   Id_curr_ref=0;
29 }
30 dac write(Id curr ref/REG CREG_GAIN/DAC LSB);

```

Рис. 7. Программный код регулятора оптической мощности лазерного диода

Регулятор состоит из ПИ-регулятора [14–16] и фильтра [17–19]. Входом регулятора является ошибка (разница значений заданной оптической мощности и текущей оптической мощности лазерного диода). Выходом является сигнал, идущий на цифро-аналоговый преобразователь. Код программы регулятора представлен на рис. 7.

На рис. 8 представлена реализация программного кода в MatLab/Simulink [20–23].

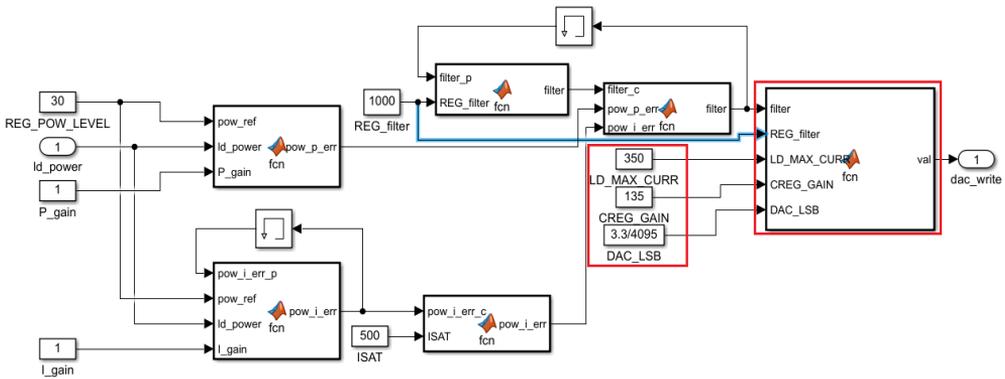


Рис. 8. Регулятор лазерного диода в MatLab/Simulink

После создания модели регулятора переходим к созданию модели САУ оптической мощностью лазерного диода.

3. Создание модели САУ

На рис. 9 приведена структурная схема САУ оптической мощностью лазерного диода.

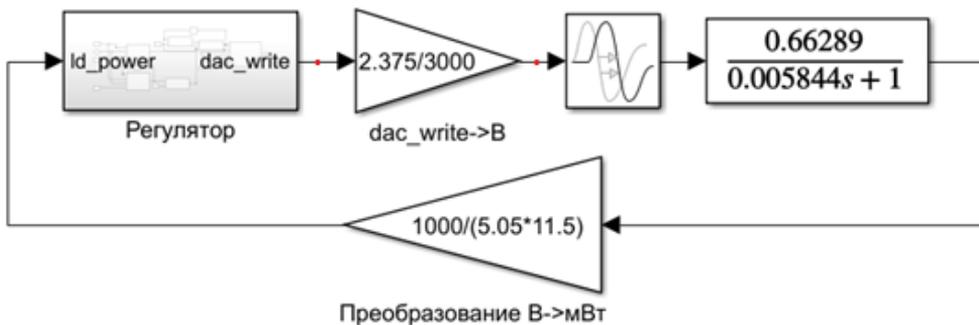


Рис. 9. Структурная схема САУ оптической мощностью лазерного диода в MatLab/Simulink

После создания модели САУ настраиваем частоту работы регулятора и частоту работы модели. Для этого получаем частоту работы регулятора с осциллографа (рис. 10).

Настройка частоты работы регулятора позволит адекватно моделировать процессы, протекающие в САУ оптической мощностью лазерного диода.

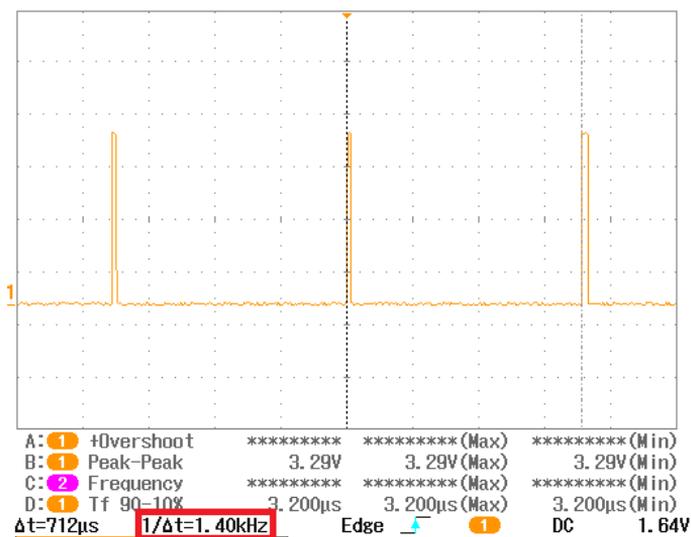


Рис. 10. Частота работы контроллера

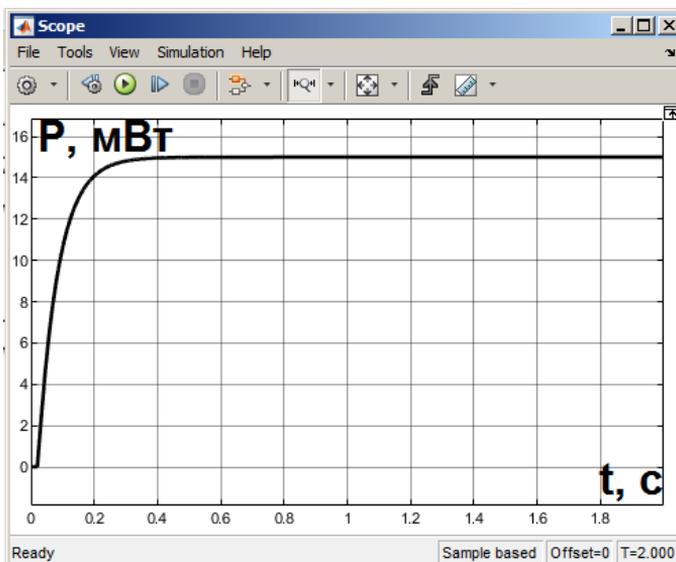


Рис. 11. Результат работы модели САУ оптической мощностью лазерного диода

Для запуска модели необходимо выставить коэффициенты регулятора и параметр модели:

- задающее воздействие;
- коэффициент усиления пропорциональной части регулятора;
- коэффициент усиления интегральной части регулятора;
- ограничение значения интегральной части интегратора;
- коэффициент фильтрации;
- ограничение по току.

После выставления коэффициентов регулятора получим реакцию лазера на управляющее воздействие, приведенную на рис. 11.

Адекватность модели [24] подтверждается проведенным экспериментом на реальной САУ. Результаты эксперимента представлены на рис. 12.

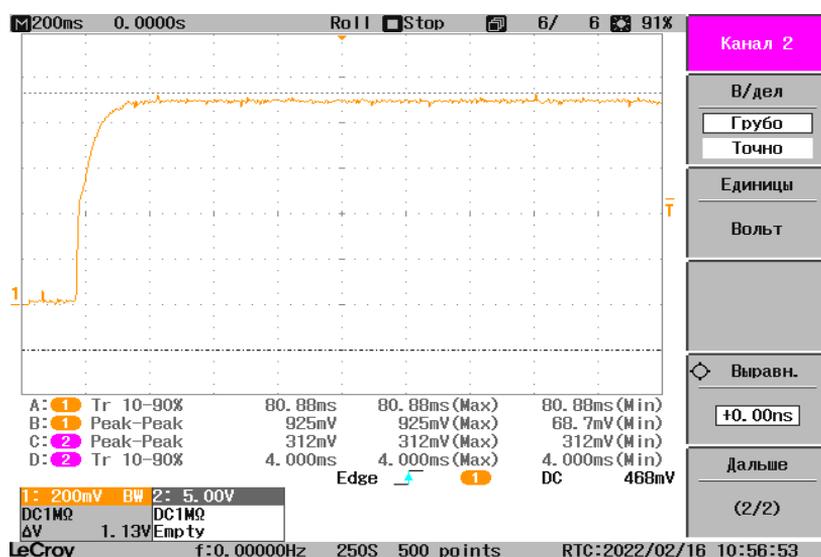


Рис. 12. Результат работы САУ оптической мощностью лазерного диода

Убедившись в адекватности модели, переходим к настройке регулятора САУ оптической мощностью лазерного диода.

4. Оптимизация регулятора

Использовался градиентный метод подбора [25] коэффициентов регулятора САУ оптической мощностью лазерного диода.

Оптимизация коэффициентов регулятора проводилась с помощью MatLab/Simulink Design Optimization [23]. Результаты оптимизации приведены на рис. 13. Были получены следующие коэффициенты регулятора: $K_p = 4,27$ и $K_i = 0,25$.

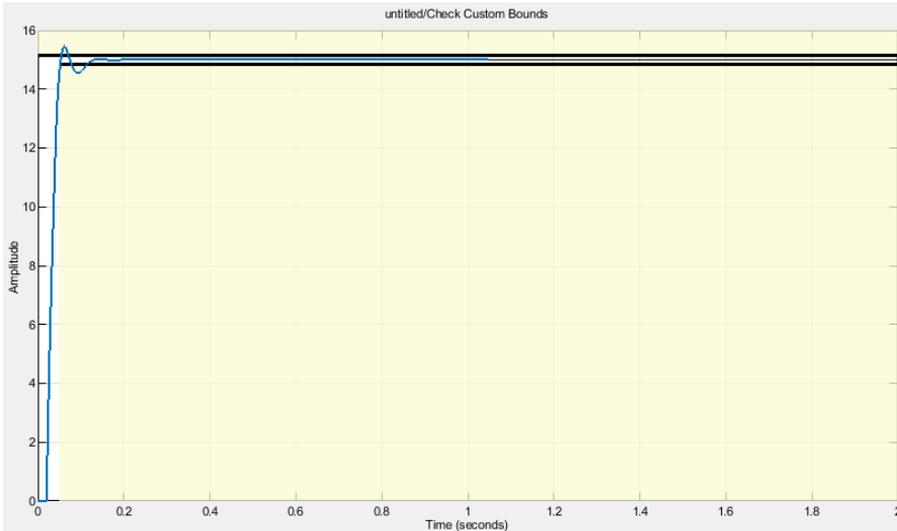


Рис. 13. Результат работы модели САУ с оптимизированным регулятором

Полученные коэффициенты регулятора применяем в реальной САУ оптической мощностью лазерного диода. Полученный результат представлен на рис. 14.

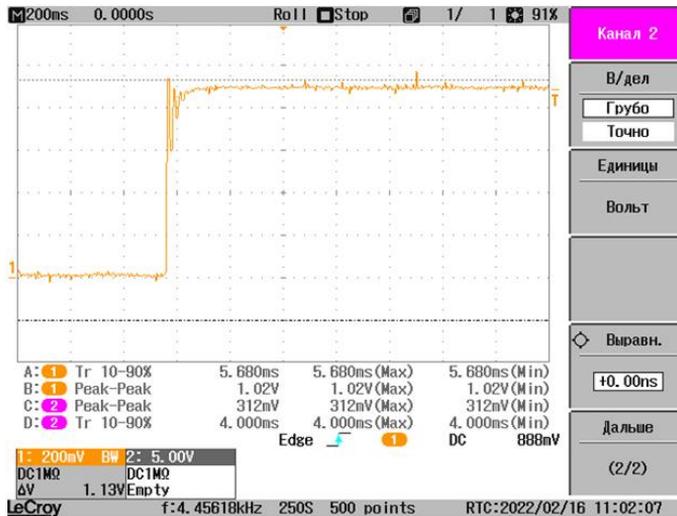


Рис. 14. Результат работы САУ с оптимизированным регулятором

Полученные результаты (рис. 14) доказывают эффективность оптимизации коэффициентов ПИ-регулятора. В данном случае оптимизация коэффициентов ПИ-регулятора позволяет уменьшить время переходного процесса с 0,3 до 0,1 с.

После оптимизации регулятора САУ оптической мощностью лазерного диода быстрее реагирует на изменения оптической мощности. Тем самым уменьшаются время функциональной готовности и нестабильность выходной мощности излучения лазерного диода.

Заключение

В ходе выполнения работы осуществлен анализ САУ оптической мощностью лазерного диода для оптимизации коэффициентов регулятора и получены следующие основные результаты:

- выполнена идентификация лазерного диода как объекта управления с помощью интегрирования экспериментальных данных;
- построена модель регулятора в MatLab/Simulink;
- создана модель САУ оптической мощностью лазерного диода в MatLab/Simulink;
- проведена оптимизация коэффициентов регулятора с помощью математических методов.

При дальнейших исследованиях представляется целесообразным рассмотреть возможность замены структуры регулятора САУ оптической мощностью лазерного диода, например, на нечёткий регулятор с целью повышения качества управления (по параметрам: 1) уменьшение времени выхода на режим, 2) увеличение точности поддержания заданных параметров, 3) компенсация случайных выбросов и шумов в цепи обратной связи).

Библиографический список

1. Schubert E.F., Gessmann T., Kim J.K. Light emitting diodes. – John Wiley & Sons, Inc., 2005.
2. Liu S., Luo X. LED packaging for lighting applications: design, manufacturing, and testing. – John Wiley & Sons, 2011.
3. Weinert J., Spaulding C. LED lighting explained. – Burlington (MA): Philips Color Kinetics Inc. – 2010.
4. Никифоров С. Система параметров светодиодов Электрические, фотометрические, спектральные (колориметрические) и энергетические характеристики // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 5. – № 13. – С. 16–27.

5. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна / СПбГУ ИТМО. – СПб., 2009.

6. Design optimization of light emitting diode module «chip on-board» for light extraction increase / S.N. Lipnitchkaia, K.D. Mynbaev, L.A. Nikulina, V. Kramnik, V.E., Bougrov A.R. Kovsh, M.A. Odnoblyudov, A.E. Romanov // Conference Proceedings – 12th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNM 2013. – 2013. – P. 6644845.

7. Highbrightness InGaN–GaN power flip-chip LEDs / S.J. Chang, W.S. Chen, S.C. Shei, C.T. Kuo, T.K. Ko, C.F. Shen // Journal of Lightwave Technology. – 2009. – Vol. 27, № 12. – P. 1985–1989.

8. Emission pattern control and polarized light emission through patterned graded-refractiveindex coatings on GaInN light-emitting diodes / M. Ma, A.N. Noemaun, J. Cho, E.F. Schubert, G.B. Kim, C. Sone // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, № 15. – P. 16677–16683.

9. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.

10. ГОСТ 17490–77. Лазеры и излучатели инжекционные, диоды лазерные. Основные параметры. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 7 с.

11. Стариков С.С., Кель О.Л., Вольхин И.Л. Измерение шумов волоконно-оптических источников излучения // Вестник Пермского университета. Физика. – 2019. – Вып. 43. – С. 66–73.

12. Леготкина Т.С, Данилова С.А. Методы идентификации систем: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 123 с.

13. Лукас В.А. Теория управления техническими системами: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., испр. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. – 677 с.

14. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

15. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – 3-е изд., испр. – М.: Наука; Главная редакция физ.-мат. литературы, 1995. – 768 с.

16. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 152 с.

17. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., стер. – СПб: Лань, 2021. – 616 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/180825> (дата обращения: 06.04.2022).

18. Аверьянов Г.С., Яковлев А.Б. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – Омск: Изд-во Омск. гос. техн. ун-та, 2017. – 108 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493256> (дата обращения: 06.04.2022).

19. Цветкова О.Л. Теория автоматического управления: учебник. – М.; Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 209 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=443415> (дата обращения: 06.04.2022).

20. Дьяконов В.П. MatLab R2006/2007/2008+Simulink 5/6/7. Основы применения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Солон-пресс, 2008. – 800 с.

21. Гультияев А.К. Визуальное моделирование в среде MatLab: учебный курс. – СПб.: Питер, 2000. 430 с.

22. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // СТА. (рубрика «В записную книжку инженера»). – М.: СТА-ПРЕСС, 2006. – № 4. – 95 с.

23. Моделирование в среде MatLab/Simulink: метод. указания к лабораторным работам / сост. А.И. Герасимов, В.В. Регода, О.Н. Регода. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. – 104 с.

24. Математическое моделирование: учебно-метод. пособие / сост. Н.Н. Максимова. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2019. – 88 с.

25. Гасников В.А. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – М.: Изд-во МФТИ, 2018. – 286 с.

References

1. Schubert E.F., Gessmann T., Kim J.K. Light emitting diodes. John Wiley & Sons, Inc., 2005.

2. Liu S., Luo X. LED packaging for lighting applications: design, manufacturing, and testing. John Wiley & Sons, 2011.

3. Weinert J., Spaulding C. LED lighting explained. Burlington (MA): Philips Color Kinetics Inc., 2010.

4. Nikiforov S. Sistema parametrov svetodiodov Elektricheskie, fotometricheskie, spektral'nye (kolorimetricheskie) i energeticheskie kharakteristiki [LED parameters system Electrical, photometric, spectral (col-

orimetric) and energy characteristics]. *Poluprovodnikovaia svetotekhnika*, vol. 5, no. 13, pp. 16-27.

5. Nikonorov N.V., Sidorov A.I. *Materialy i tekhnologii volokonnoi optiki: spetsial'nye opticheskie volokna* [Materials and technologies of fiber optics: special optical fibers]. Saint Petersburg: Sankt Peterburgskii gosudarstvennyi universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2009.

6. Lipnitskaia S.N., Mynbaev K.D., Nikulina L.A., Kramnik V., Bougrov V.E., Kovsh A.R., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E. Design optimization of light emitting diode module «chip on-board» for light extraction increase. *Conference Proceedings - 12th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNM 2013.* – 2013. – P. 6644845.

7. Chang S.J., Chen W.S., Shei S.C., Kuo C.T., Ko T.K., Shen C.F. Highbrightness InGaN-GaN power flip-chip LEDs. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, vol. 27, no. 12, pp. 1985-1989.

8. Ma M., Noemaun A.N., Cho J., Schubert E.F., Kim G.B., Sone C. Emission pattern control and polarized light emission through patterned graded-refractiveindex coatings on GaInN light-emitting diodes. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 15, pp. 16677-16683.

9. ХИЖНЯКОВ Ю.Н. [Fuzzy, neural and hybrid control]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, 303 p.

10. GOST 17490-77. Lazery i izluchateli inzhektionsionnye, diody lazernye. Osnovnye parametry [GOST 17490-77. Injection lasers and emitters, laser diodes. Main parameters]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2000, 7 p.

11. Starikov S.S., Kel' O.L., Vol'khin I.L. Izmerenie shumov volokonno-opticheskikh istochnikov izlucheniia [Noise measurement of fiber optic sources]. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika*, 2019, iss. 43, pp. 66-73.

12. Legotkina T.S, Danilova S.A. *Metody identifikatsii sistem* [System identification methods]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 123 p.

13. Lukas V.A. *Teoriia upravleniia tekhnicheskimi sistemami* [Theory of control of technical systems]. 4nd ed. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi gornyi universitet, 2005, 677 p.

14. Dorf R., Bishop R. *Sovremennye sistemy upravleniia* [Modern control systems]. Moscow: Laboratoriia bazovykh znanii, 2002, 832 p.

15. Besekerskii V.A., Popov E.P. Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia [Theory of automatic control systems]. 3rd ed. Moscow: Nauka, Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1995, 768 p.

16. Zaitsev A.P. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniia [Fundamentals of the theory of automatic control]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2000, 152 p.

17. Pervozvanskii A.A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniia [Automatic control theory course]. 4th ed. Saint Petersburg: Lan', 2021, 616 p., available at: <https://e.lanbook.com/book/180825> (accessed 06 April 2022).

18. Aver'ianov G.S., Iakovlev A.B. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniia [Fundamentals of the theory of automatic control]. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2017, 108 p., available at: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493256> (accessed 06 April 2022).

19. Tsvetkova O.L. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Theory of automatic control]. Moscow, Berlin: Direkt-Media, 2016, 209 p., available at: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=443415> (accessed 06 April 2022).

20. D'iaconov V.P. MatLab R2006/2007/2008+Simulink 5/6/7. Osnovy primeneniia [MatLab R2006/2007/2008+Simulink 5/6/7. Application Basics]. 2nd ed. Moscow: Solon-press, 2008, 800 p.

21. Gul'tiaev A.K. Vizual'noe modelirovanie v srede MatLab [Visual modeling in the MatLab environment]. Saint Petersburg: Piter, 2000. 430 p.

22. Denisenko V. PID-regulatory: printsipy postroeniia i modifikatsii [PID controllers: principles of construction and modification]. *STA (rubrika "V zapisnuiu knizhku inzhenera")*. Moscow: STA-PRESS, 2006, no. 4, 95 p.

23. Gerasimov A.I., Regeda V.V., Regeda O.N. Modelirovanie v srede MatLab/Simulink [Modeling in MatLab/Simulink]. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi universitet, 2017, 104 p.

24. Maksimova N.N. Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical modeling]. Blagoveshchensk: Amurskii Gosudarstvennyi universitet, 2019, 88 p.

25. Gasnikov V.A. Sovremennye chislennye metody optimizatsii. Metod universal'nogo gradientnogo spuska [Modern numerical optimization methods. Universal Gradient Descent Method]. 2nd ed. Moscow: Moskovskii fiziko-tekhnicheskii institut, 2018, 286 p.

Сведения об авторе

Загвозкин Владимир Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladimit.zagvozkina@gmail.com).

About the author

Vladimir V. Zagvozkina (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Automation and Telemechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: vladimit.zagvozkina@gmail.com).

Поступила: 13.04.2022. Одобрена: 20.07.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад автора. Вклад автора 100 %.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Загвозкин, В.Д. Оптимизация регулятора оптической мощности лазерного диода / В.Д. Загвозкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 80–95. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.05

Please cite this article in English as:

Zagvozkina V.D. Optimization of laser diode optical power controller. *Perm National Research Polytechnic University bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 80-95. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.05