

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КАЛИБРОВОЧНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

© 2017

**В. В. Волков** инженер-конструктор;  
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;  
[volvvv@mail.ru](mailto:volvvv@mail.ru)

Совершенствование методик радиометрической коррекции многоканальной спектральной аппаратуры и широкое распространение светодиодных источников требуют развития как математических, так и экспериментальных методов калибровки полученных спектральных данных. Получение истинных коэффициентов спектрального отражения требует применения высокостабильных источников излучения, что позволяет повысить точность измерения. Применение сверхъярких светодиодов для целей радиометрической калибровки ограничивается вариациями их характеристик во времени, деградацией структур и температурным дрейфом характеристик. Стабилизация спектрального максимума излучения светодиодов требует привлечения дополнительных методов термостабилизации источников излучения путём контроля выделяемой мощности на кристалле с учётом нелинейности кривой фотоотдачи кристалла в зависимости от протекаемого тока. Именно нелинейность процессов тепловыделения кристалла при выходе на оптимальную рабочую точку требует применения высокоточного режима термостабилизации. Разработана и экспериментально апробирована методика «пропорционального интегрально-дифференциального» регулирования температуры для светоизлучающих диодов повышенной яркости с люминофорным покрытием кристалла. Показана возможность применения термостабилизации высокостабильного источника для целей стабилизации спектральных характеристик, что позволяет использовать данную методику для повышения точности оценки оптических свойств изучаемой поверхности.

*Калибровочный источник; терморегулятор; пропорциональный интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД); светоизлучающие диоды; спектральная плотность.*

---

*Цитирование:* Волков В.В. Моделирование и экспериментальная отработка системы терморегулирования калибровочного источника излучения на базе ПИД-регулятора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 4. С. 101-107. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-101-107

---

### Введение

Использование аппаратно-программного комплекса на базе микроконтроллера *AtMega 328* и программной среды *Matlab* вместе с источником излучения повышенной мощности позволяет изучить особенности функционирования и определить ряд требований для сохранения постоянной спектральной плотности излучения на различных длинах волн. Полученный источник вместе с управляющей системой излучения может использоваться как калибровочный источник для различных видов наземных гиперспектрометров, а также использоваться вместе с ними при лабораторных испытаниях аппаратуры.

Объектом исследования в данной работе является прецизионный светодиодный источник излучения, предмет исследования – система обеспечения теплового режима (СОТР) и система токовой стабилизации источника излучения. Целью работы является разработка программно-аппаратного комплекса для настройки ПИД-регуляторов системы обеспечения теплового режима для сохранения постоянства спектральных характеристик излучателей.

Необходимость применения ПИД-регулятора диктуется тем, что работа пропорционального регулятора при достаточно малом коэффициенте усиления приводит к

возникновению ненулевой статической ошибки, а при большом коэффициенте усиления могут возникнуть неприемлемые колебательные процессы. Поэтому интегральная составляющая необходима для устранения статической ошибки. В условиях действия внешних температурных возмущений на объект управления регулятор должен обеспечить быстрый выход на заданный режим, что при правильной настройке обеспечивает дифференциальная составляющая регулятора.

### **Модель объекта управления**

К разрабатываемому ПИД-регулятору предъявляются следующие требования по форме отклика на внешние возмущения:

- перерегулирование – не более 0,5 °С;
- статическая ошибка – 0,1 °С;
- время установления – не более 100 с;
- коэффициент затухания – больше 4.

Рассмотрим метод настройки ПИД-регулятора. Для применения аналитических методов автоматической настройки ПИД-регуляторов используются, как правило, модели объектов управления, представляющие собой устойчивые апериодические звенья первого и второго порядка с транспортной задержкой. В рассматриваемом случае с учётом нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводникового перехода применима модель [1] второго порядка:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-sL}, \quad (1)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени;  $K$  – коэффициент передачи;  $L$  – динамическая задержка, аппроксимированная в данном случае транспортной задержкой.

Для получения численных коэффициентов моделей объектов управления, аппроксимированных передаточной функцией (1), производится идентификация с помощью тестовых воздействий. В работе для определения характеристик проводилась подача ступенчатого воздействия.

Единичный скачок (ступенчатое воздействие), подаваемый на вход системы, в отличие от других тестовых сигналов позволяет получить установившееся значение выходной величины системы и точно определить коэффициент передачи объекта в установившемся режиме. Особенно полезно применение прямоугольного импульса, имеющего большую спектральную плотность в области высоких частот и множество гармонических составляющих в спектре сигнала.

Один из методов расчёта, предложенный в [2] для расчёта коэффициентов по отклику на изменение величины уставки, даёт следующие соотношения:

$$K_p = \frac{1.2T}{0.63KL}; K_i = \frac{K_p}{2L}; K_d = K_p L. \quad (2)$$

Данные соотношения обеспечивают декремент затухания равный четырём. При использовании соотношений (2) важно заметить, что они являются эмпирическими и могут быть применены только в ограниченном диапазоне значений постоянного времени и задержки. Это означает, что значение соотношения  $L/T$  не должно лежать вне диапазона (0,1;1,0). Метод расчёта коэффициентов регулятора основан на определении

некоторых особенностей динамики процессов и даёт хорошую настройку только в ограниченных ситуациях.

Подаваемое на вход объекта управления тестовое воздействие должно иметь достаточно малую амплитуду, но в то же время отношение сигнала к шуму должно быть достаточно большим для наиболее точной идентификации. Для модели объекта управления, аппроксимированной передаточной функцией (1), реакция на ступенчатое воздействие во временной области выглядит как

$$h(t) = K \left( 1 - e^{-\frac{t-L}{T}} \right).$$

Используя такое понятие как средняя длительность переходного процесса ( $T_{ar} = T + L$ ), можно сформулировать один из вариантов критерия, при котором кривые отклика объекта управления для модели [2] можно в некотором приближении считать совпадающими. Данное условие достигается при пересечении переходных характеристик модели и объекта на определённом уровне:

$$h(t) = K(1 - e^{-1}) = 0,63K. \quad (3)$$

Коэффициент передачи  $K$  вычисляется следующим образом:

$$K = \frac{y(st) - y_0}{U_{\max}}, \quad (4)$$

где  $y(st)$  – установившееся значение реакции на воздействие;  $y_0$  – начальное выходной величины;  $U_{\max}$  – амплитуда входного сигнала.

Параметр  $a$ , применяемый для настройки коэффициентов регулятора, можно определить из определения подобия треугольников:

$$\frac{L}{T} = \frac{a}{0,63K} \Rightarrow a = \frac{0,63KL}{T}. \quad (5)$$

Проведём экспериментальную оценку применимости данных коэффициентов, применив их в алгоритме, заложенном в программу микроконтроллера, управляющего режимом энергопотребления.

### Экспериментальное исследование

Как известно, основными влияющими факторами, оказывающими воздействие на спектральную плотность и положение максимума излучения, являются температура кристалла и напряжение, приложенное к излучающему переходу. Именно неравномерность рабочего участка вольт-амперной характеристики светодиодов требует привлечения методов токовой стабилизации кристалла, что не может в полной мере решить задачу без применения термостабилизирующей платформы на основе радиатора. Личейный участок ВАХ говорит о выходе на рабочую точку (рис. 1), при этом рост тепловыделения кристалла определяется квадратом протекающего тока.

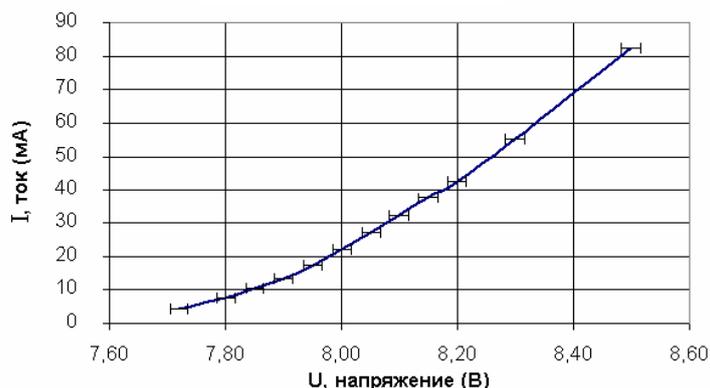


Рис. 1. Рабочий участок вольт-амперной характеристики светодиода

Для целей апробации и исследования выбраны светодиоды повышенной яркости видимого диапазона. Особенностью их строения является применение люминофорного покрытия для переизлучения исходного излучения кристалла в широком диапазоне длин волн. Предельная мощность, потребляемая одним светодиодом в штатном режиме, составляет 7 Вт. Суммарная мощность шести светодиодов не превышает 42 Вт, что требует применения теплоотводящего радиатора с датчиком температуры для получения обратной связи. На рис. 2, а представлен рабочий макет излучателя на базе диодов LXML-PW71 с алюминиевым радиатором и закреплённым термодатчиком, а на рис. 2, б – спектральная плотность отдельного светодиода.

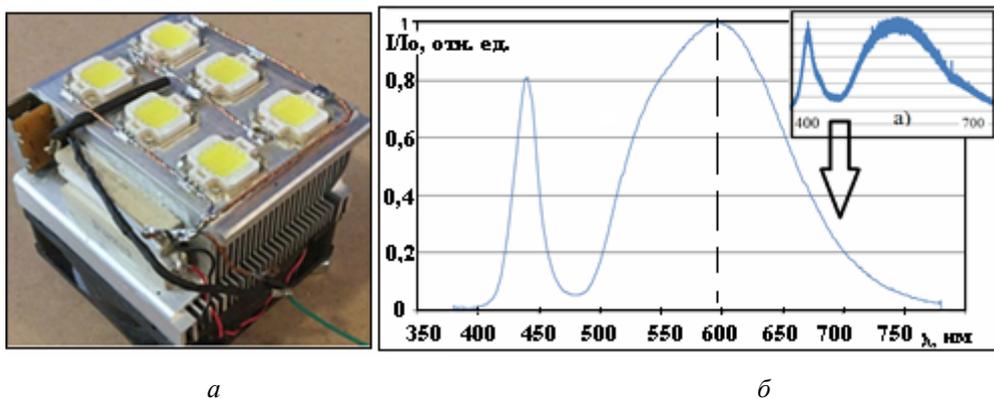


Рис. 2. Макет излучателя (а); экспериментально зарегистрированная спектральная плотность излучения (после радиометрической коррекции и фильтрации) (б)

Спектр излучения сверхъярких светодиодов записывался с использованием прецизионного щелевого Фурье-спектрометра с последующей оцифровкой 12-битным кодом. Полученные экспериментальные данные спектральной плотности излучения подвергались медианной фильтрации (для подавления шумов) и радиометрической коррекции с учётом чувствительности фотодиода, расположенного в щелевом приёмнике излучения.

В процессе экспериментального исследования было определено, что смещение максимума излучения происходит при увеличении напряжения питания более чем на 10% от номинального значения. Это приводит к увеличению выделяемой тепловой мощности на 73%.

Точность температурной стабилизации определим через смещение максимума кривой от приложенного напряжения. Так при напряжении питания 8,0 В (ток 50 мА) максимум излучения соответствует 593 нм, а при напряжении 8,5 В (ток 70 мА) – 593,2 нм, при этом кривая спектральной плотности полностью совпадает по форме. Однако при снижении питающего напряжения до 8 В происходит смещение максимума излучения в область более длинных волн на 0,2 нм, что говорит о несущественном изменении теплового режима светодиода и пренебрежимо малом смещении максимума излучения с сохранением формы кривой спектральной плотности.

Рассмотрим построение аппаратно-программного комплекса для ПИД-регулятора на базе отладочной платы со встроенным контроллером AVR AtMega328.

На этапе разработки комплекса должны быть решены следующие задачи:

1. Реализация ПИД контроллера на базе 8-разрядного МК, слежение за ходом процесса управления оператором в режиме реального времени.
2. Возможность изменения оператором некоторых настроек в системе непосредственно во время процесса управления.

Структурная схема программной модели комплекса представлена на рис. 3.

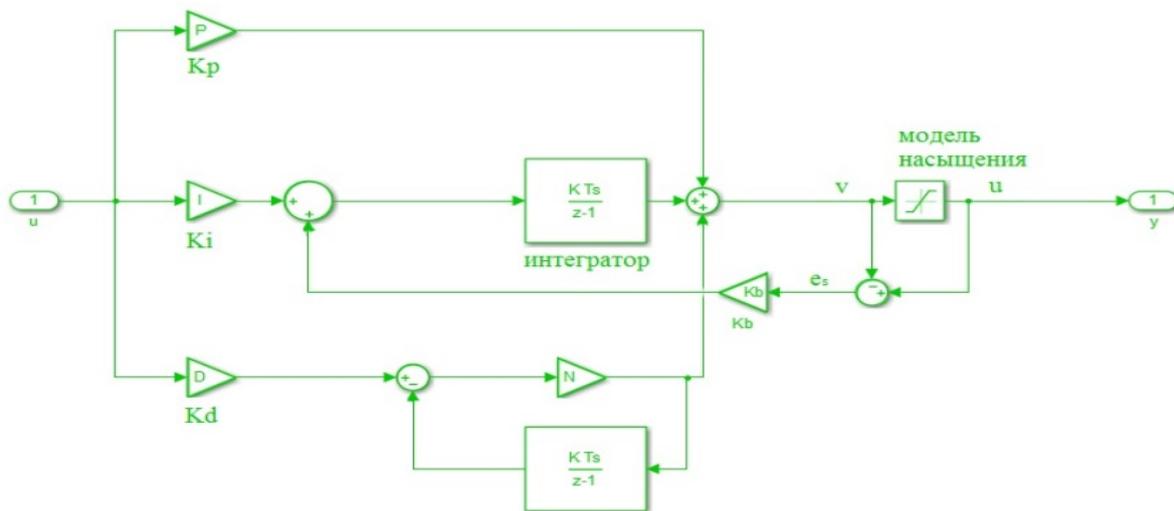


Рис. 3. Структурная схема ПИД-регулятора

На рис. 3:  $T_s$  – шаг дискретизации;  $N$  – коэффициент, задающий граничную частоту фильтра нижних частот для дифференциальной составляющей регулятора;  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициенты пропорциональной, интегральной, дифференциальной составляющих регулятора соответственно.

Объект управления представляет собой нелинейную резистивную нагрузку – светодиод с известной ВАХ. Сигналы с датчика температуры, расположенного на радиаторе, с помощью реализованной четырёхпроводной схемы измерения поступают на схему смещения и усиления сигнала, а затем на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера, в котором реализован алгоритм управления. Управление светодиодом осуществляется с помощью выводов общего назначения микроконтроллера и схемы транзисторных ключей.

На этапе разработки данной схемы определены следующие требования к температурным датчикам, сигнал с которых снимается с помощью четырёхпроводной схемы измерения. Для слежения за ходом изменения температуры необходимо применение высокоточного преобразователя, в качестве которого, после серии опытов с термопа-

рой, был выбран медный термодатчик ТМ 232, имеющий таблицу калибровочных данных, поделённых на группы чувствительности.

Оцифровка полученных данных сопротивления осуществляется встроенным в контроллер 12-битным АЦП последовательного приближения с заданием опорного напряжения от внутреннего источника.

Сигнал из датчика по четырёхпроводной схеме измерения подаётся на делитель напряжения для достижения требуемого смещения сигнала. Для защиты входов АЦП от высокого напряжения применяется схема диодного ограничения из резистора и стабилитрона. Разность значений температуры уставки и сигнала с датчика подаётся на вход ПИД-регулятора.

С помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) осуществляется управление внешним транзисторным ключом через порт вывода общего назначения. Реализация ШИМ [3] показана на рис. 4.

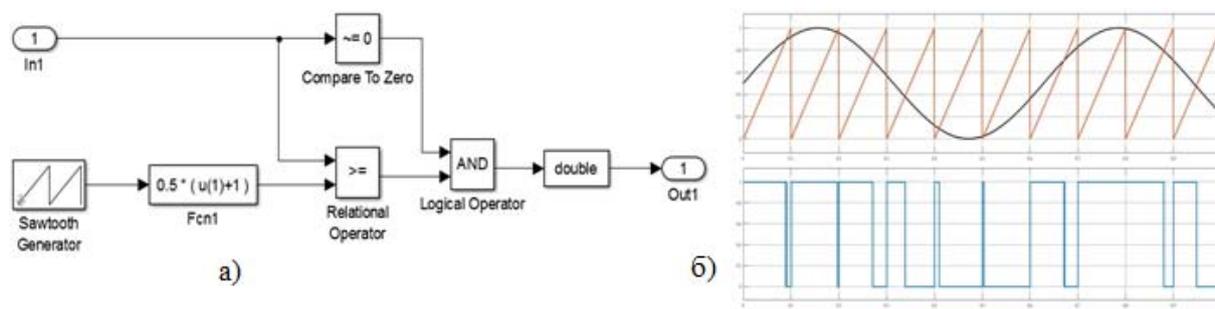


Рис. 4. Структурная схема ШИМ-генератора (а); результаты моделирования (б)

На вход  $In1$  подаётся сигнал, который нужно преобразовать в последовательность импульсов различной скважности. Диапазон изменения сигнала для модуляции  $In1 = 0 \div 1$ . Далее сигнал сравнивается с нулём и со значением вспомогательного пилообразного сигнала, частота которого должна быть намного больше, чем частота моделируемого сигнала. На выходе ШИМ получается нулевое значение, когда значение пилообразного сигнала оказывается выше, чем значение моделируемого сигнала, и единичное значение в противоположном случае.

График процесса регулирования со всеми одновременно работающими контурами управления представлен на рис. 5. Процесс регулирования сопровождается незатухающими колебаниями малой амплитуды. При этом выполняются основные требования к качеству переходного процесса.

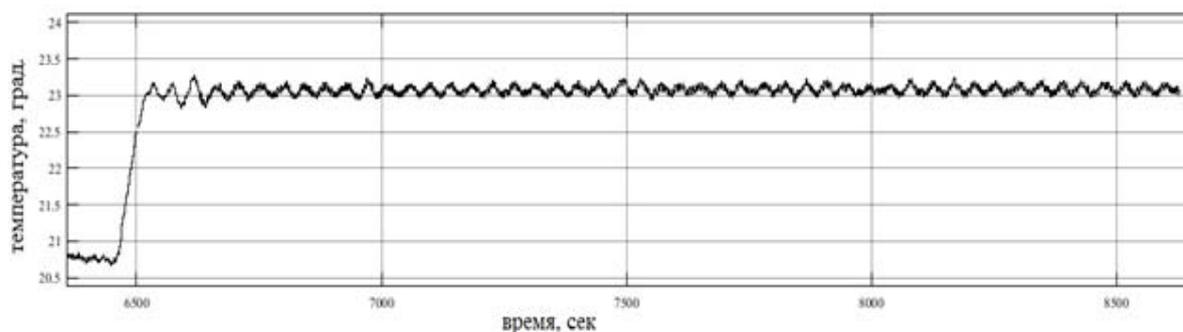


Рис. 5. Экспериментальная проверка коэффициентов регулятора

## Заключение

Экспериментальная проверка методов автоматической настройки ПИД-регуляторов с учётом требований, предъявляемых к качеству регулирования, показала пригодность используемого метода. Метод обеспечивает большой запас устойчивости и приемлемую реакцию на внешние возмущения. Однако наблюдается слишком большое перерегулирование в реакции системы на изменение величины уставки – до 40% от изменения величины.

## Библиографический список

1. Astrom K.J., Hagglund T. PID controllers: theory, design, and tuning. Washington: Instrument Society of America, 1995. 354 p.
2. Денисенко В.В. Термопреобразователи сопротивления // Современные технологии автоматизации. 2014. № 1. С. 98-101.
3. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.

## SIMULATION AND EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE CONTROL SYSTEM OF A RADIATION CALIBRATION SOURCE BASED ON A PID-REGULYATOR

© 2017

**V. V. Volkov** Design Engineer;  
Joint Stock Company Space Rocket Center Progress, Samara, Russian Federation;  
[volkovvv@mail.ru](mailto:volkovvv@mail.ru)

Improvement of methods of radiometric correction for multichannel spectral hardware and wide usage of LED-sources require the development of both mathematical and experimental methods of calibration of the obtained spectral data. To obtain true coefficients of spectral reflection it is necessary to use high-stable radiation sources, which makes it possible to improve measuring accuracy, to perform a transition from absolute to relative units of measure. Application of high-brightness LEDs for the purposes of radiometric calibration is limited by variations of their characteristics over time, degradation of structures and temperature drift of characteristics. To stabilize the spectral LED radiation maximum we need to resort to additional methods for the temperature control of radiation sources by controlling dissipation power on the crystal, taking into account high nonlinearity of the dissipation curve of the crystal depending on the passing current. The nonlinearity of the processes of the crystal heat release at the optimum operation point calls for the application of a high-precision mode of temperature control. A technique of “proportional integral-derivative” temperature control for light-emitting diodes of increased brightness with phosphor-coated crystals was developed and experimentally tested. The possibility of using temperature control of a highly stable source to stabilize spectral characteristics is shown. It allows using this technique to increase the accuracy of assessing the optical properties of the surface under investigation.

*Calibration source; temperature control; proportional integral-derivative (PID) regulator; emitting diode; spectral density.*

---

*Citation:* Volkov V.V. Simulation and experimental development of a temperature control system of a radiation calibration source based on a PID-regulyator. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 4. P. 101-107. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-101-107

## References

1. Astrom K.J., Hagglund T. PID controllers: theory, design, and tuning. Washington: Instrument Society of America, 1995. 354 p.
2. Denisenko V.V. Resistive temperature transducers. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*. 2014. No. 1. P. 98-101. (In Russ.)
3. Grop D. *Metody identifikatsii sistem* [System identification methods]. Moscow: Mir Publ., 1979. 302 p.