

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Оригинальная статья / Original article

УДК 628.93:004.94

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402.295-317



Компьютерное моделирование цифровой системы автоматического регулирования освещенности

Е. А. Шабаеть¹ ✉, М. М. Романовец²

¹ Кубанский государственный технологический университет
(г. Краснодар, Российская Федерация)

² Азово-Черноморский инженерный институт
Донского ГАУ (г. Зерноград, Российская Федерация)

✉ sea007@rambler.ru

Аннотация

Введение. В птицеводстве перспективным направлением является применение систем локального светодиодного освещения с изменяемой освещенностью и коррелированной цветовой температурой оптического излучения светильников в течение светового периода. Для точного поддержания интенсивности света на заданном уровне требуется система автоматического регулирования освещенности.

Цель исследования. Определение параметров пропорционально-интегрального регулятора цифровой системы автоматического регулирования освещенности в клетках для содержания сельскохозяйственной птицы, обеспечивающих требуемые показатели качества.

Материалы и методы. В работе использованы элементы математической статистики, теории планирования экспериментальных исследований, корреляционно-регрессионного анализа, теории автоматического управления и компьютерного моделирования. Натурные эксперименты проводились на лабораторном образце цифровой системы динамического локального освещения. Компьютерное моделирование было выполнено в среде SimInTech.

Результаты исследования. Разработана компьютерная модель цифровой системы автоматического регулирования освещенности. Выполнен расчет настроек ПИ-регулятора по методам ШР, ВТИ, Копеловича. Произведена сравнительная оценка качества процесса регулирования по графикам переходных процессов, полученных путем компьютерного моделирования. Достоверность результатов компьютерного моделирования системы автоматического регулирования освещенности подтверждена экспериментально.

Обсуждение и заключение. Высокие показатели качества регулирования цифровой системы автоматического регулирования освещенности обеспечил ПИ-регулятор с $k_p = 14,027 \cdot 10^{-3}$ и $T_i = 145,72$ мс, рассчитанными по методу Копеловича. Сравнительная оценка переходных процессов в реальной системе и в компьютерной модели

© Шабаеть Е. А., Романовец М. М., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

данной системы позволяет сделать вывод о высокой точности разработанного образа и корректности выбора параметров моделирования в среде SimInTech. Экспериментально установлено, что требуемое качество процесса регулирования системы обеспечивается для широкого диапазона заданной освещенности от 1 до 25 лк.

Ключевые слова: система локального освещения, светодиодный светильник, управление освещенностью, САР, ПИ-регулятор, моделирование, компьютерная модель, SimInTech

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

Для цитирования: Шабаетв Е. А., Романовец М. М. Компьютерное моделирование цифровой системы автоматического регулирования освещенности // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 295–317. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.295-317>

Computer Simulation of a Digital System of Automatic Light Control

E. A. Shabaev^a✉, M. M. Romanovets^b

^a Kuban State Technological University
(Krasnodar, Russian Federation)

^b Azov-Black Sea Engineering Institute
of Don State Agrarian University
(Zernograd, Russian Federation)

✉ sea007@rambler.ru

Abstract

Introduction. In the poultry industry, the use of local LED lighting systems with changeable light and correlated color temperature of the luminaire optical radiation during the photoperiod is promising. To maintain light intensity accurately at a specified level, the use of an automatic control system (ACS) of lighting is required.

Aim of the Study. The study aimed at determining the parameters for the PI controller of the digital ACS of lighting in all-age cages, providing the required quality indicators of the regulatory process.

Materials and Methods. For the study there were used the elements of mathematical statistics, experimental research design theory, correlation and regression analysis, automatic control theory and computer simulation. Real experiments were carried out on a laboratory sample of a digital dynamic local lighting system. Computer simulation was performed in the SimInTech program.

Results. A computer model for a digital ACS of lighting has been developed. The tunings of the PI controller were calculated using the CHR, VTI, and Kopelovich methods. A comparative estimation of the control process quality was carried out using graphs of transient processes obtained by computer simulation. The reliability of the results of computer simulation of ACS lighting has been confirmed experimentally.

Discussion and Conclusion. High regulator performance indicators for the digital ACS of lighting were ensured by a PI controller with $k_p = 14.027 \cdot 10^{-3}$ and $T_i = 145.72$ ms calculated using the Kopelovitch method. A comparative assessment of transient processes in a real ACS and in a computer model of this system allows concluding that the developed model is highly accurate and the choice of simulation parameters in the SimInTech program is correct. It has been experimentally established that the required quality of the control process of ACS is ensured for a wide range of specified lighting: from 1 to 25 lux.

Keywords: local lighting system, LED lamp, lighting control, digital automatic control system, PI controller, simulation, computer model, SimInTech

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements: The authors would like to thank anonymous reviewers.

For citation: Shabaev E.A., Romanovets M.M. Computer Simulation of a Digital System of Automatic Light Control. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):295–317. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.295-317>

Введение. Организм сельскохозяйственной птицы очень чувствителен к воздействию света [1]. Многие процессы ее жизнедеятельности напрямую или косвенно регулируются светотемновым циклом [2–4]. В условиях интенсификации производства искусственная среда содержания животных и птиц не всегда соответствует физиологическим потребностям их организма [5–7]. За счет создания благоприятной световой среды можно повысить продуктивность сельскохозяйственной птицы. Для этой цели наиболее перспективно применение локального освещения с большим количеством светильников малой мощности [8–10].

Реализовать искусственную световую среду с рациональными параметрами позволяет цифровая система динамического локального освещения клеток с изменяемой освещенностью и коррелированной цветовой температурой (далее – КЦТ) [10]. Такая система позволяет в автоматическом режиме управлять световыми потоками светодиодов теплого и холодного свечений, изменяя уровень освещенности и КЦТ оптического излучения светильников в соответствии с динамикой естественного солнечного света [11; 12], что положительно сказывается на продуктивности и физиологическом состоянии сельскохозяйственной птицы [13–17].

Точное поддержание заданного уровня освещенности обеспечивается системой автоматического регулирования (далее – САР) освещенности. Применение САР позволяет компенсировать запыленность светильников, деградацию светодиодов в процессе эксплуатации и изменения фоновой освещенности в помещении.

В результате анализа и синтеза САР освещенности необходимо определить тип закона управления и оптимальные настройки регулятора. При этом следует учитывать широкий диапазон изменения заданного уровня освещенности и следующие показатели качества регулирования в установившемся режиме: статическая ошибка $\Delta E_{ст} \leq 2,5\%$; время регулирования $t_p \leq 1$ с; перерегулирование $\sigma \leq 10\%$; количество перерегулирований $n \leq 1$.

Проведенные ранее исследования показали, что экспериментальным подбором значений параметров регулятора найти их оптимальные величины затруднительно [18]. В подобных САР возможно возникновение существенных пульсаций светового потока светильников со значительным перерегулированием, а также работа в колебательном режиме. В САР освещенности целесообразно применение ПИ-регулятора, обеспечивающего требуемые показатели качества САР со статической ошибкой, близкой к нулю.

Целью настоящей работы является определение параметров ПИ-регулятора цифровой САР освещенности в клетках для содержания сельскохозяйственной птицы, обеспечивающих требуемые показатели качества процесса регулирования.

Обзор литературы. Учеными рассматриваются параметры цифровой ПИ-регулятора – пропорциональный коэффициент и постоянная времени интегрирования¹. Также для цифрового регулятора в качестве варьируемого параметра может выступать время дискретизации [19; 20]. Для определения параметров регулятора в отечественной и зарубежной практике применяются аналитические и экспериментальные методы расчета, такие как ВТИ, СибТехЭнерго, метод заданного затухания, Копеловича, Стогестада, Циглера – Никольса, Куна, Шеделя, AMIGO, Чина-Хронеса-Ресвика (CHR), численной оптимизации и др.² [21–29].

Одним из наиболее известных экспериментальных методов определения параметров регулятора является метод Циглера – Никольса, основанный на получении графика переходного процесса САР на границе устойчивости системы³ [26–29]. Однако применение его не всегда возможно и не гарантирует оптимальных показателей качества переходного процесса⁴ [29].

Метод CHR⁵ [28; 29] является развитием метода Циглера – Никольса и основан на анализе отклика объекта регулирования на ступенчатое тестовое воздействие. Данный метод позволяет получить больший запас устойчивости системы⁶ [29]. Расчет пропорционального коэффициента k_p и приведенной постоянной времени интегрирования T_I по методу CHR для аperiodического переходного процесса минимальной длительности при известных характеристиках объекта регулирования может быть произведен по выражениям:

$$k_p = \frac{0,35T_{\text{об}}}{k_{\text{об}}\tau_{\text{об}}}, \quad (1)$$

$$T_I = 1,2T_{\text{об}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{об}}$ – коэффициент передачи объекта регулирования; $T_{\text{об}}$ – постоянная времени объекта, с; $\tau_{\text{об}}$ – запаздывание на объекте, с.

¹ Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов [и др.]. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.

² Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора // Информационные системы и технологии : Сб. мат-лов XXV Междунар. науч.-техн. конф. Н. Новгород : НГТУ им. П. Е. Алексеева, 2019. С. 634–640. EDN: ZIFTIM; Гусаров А. В., Кошляков П. С. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для систем с малыми постоянными времени // Технические науки в России и за рубежом : мат-лы VIII Междунар. науч. конф. (20–23 июня 2019 г., г. Краснодар). Краснодар : Новация, 2019. С. 22–23. EDN: CSVHOR; Чернов Б. А. Настройка систем автоматического управления и регулирования : учеб. пособие для магистрантов специальности 6М070200 – Автоматизация и управление. Алматы : НАО АУЭС, 2019. 87 с.; Копелович А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960. 192 с.

³ Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора.

⁴ Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов [и др.]; Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора.

⁵ Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора; Гусаров А. В., Кошляков П. С. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для систем с малыми постоянными времени.

⁶ Гусаров А. В., Кошляков П. С. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для систем с малыми постоянными времени.

Длительную проверку временем прошел метод ВТИ⁷. Приближенные формулы для вычисления параметров настройки регуляторов по данному методу были получены на моделях объектов и реальных регуляторов с присущими им нелинейностями. В качестве критерия параметрической оптимизации в формулах ВТИ приняты степень затухания $\varphi = 75\%$ и интегральная квадратичная оценка качества, близкая к минимуму. Расчет k_p и T_I по методу ВТИ для относительного запаздывания на объекте регулирования $\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}} = 0,2-1,5$ производится по формулам:

$$k_p = \frac{0,38(\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}} + 0,6)}{k_{\text{об}}(\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}} - 0,08)}; \quad (3)$$

$$T_I = 0,8T_{\text{об}}. \quad (4)$$

В отечественной практике⁸ простотой определения приближенных параметров настройки регуляторов отличается метод, опубликованный А. П. Копеловичем⁹. Определение k_p и T_I по методу Копеловича для апериодического переходного процесса минимальной длительности производится по выражениям:

$$k_p = \frac{0,6T_{\text{об}}}{k_{\text{об}}\tau_{\text{об}}}; \quad (5)$$

$$T_I = 0,8\tau_{\text{об}} + 0,5T_{\text{об}}. \quad (6)$$

Материалы и методы. В работе использованы элементы математической статистики, теории планирования экспериментальных исследований, корреляционно-регрессионного анализа, теории автоматического управления и компьютерного моделирования. Обработка экспериментальных исследований выполнялась в программе Microsoft Office Excel.

Компьютерное моделирование проводилось в среде динамического моделирования SimInTech с использованием метода интегрирования Эйлера. Постоянный шаг интегрирования $4,883 \cdot 10^{-7}$ с принят с учетом частоты и разрядности ШИМ-сигналов токов светоизлучающих диодов (далее – СИД). Расчеты параметров ПИ-регулятора производились по методам CHR, ВТИ и Копеловича.

Объектом исследования является цифровая САР освещенности клеток для содержания сельскохозяйственной птицы. Исследования проводились на лабораторном образце цифровой системы динамического локального освещения, изображенном на рисунке 1, который включает в себя управляющий программируемый логический контроллер (далее – ПЛК) Trim5 фирмы Segnetics, многоканальный светодиодный драйвер (далее – драйвер СИД) и плату управления с микроконтроллером ATmega328P, светодиодные светильники, датчик освещенности и дополнительное электрооборудование [10]. На боковой панели стенда расположен разъем для подключения внешних светильников и датчика освещенности (далее – ДО).

⁷ Чернов Б. А. Настройка систем автоматического управления и регулирования.

⁸ Там же; Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора.

⁹ Копелович А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов.

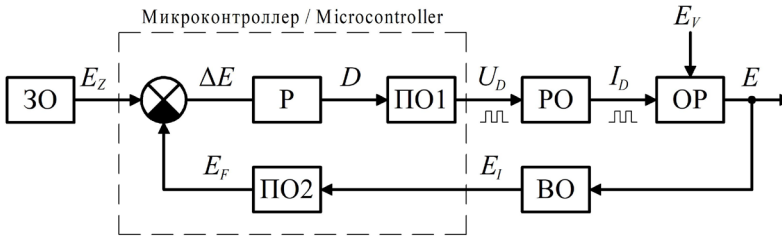


Р и с. 1. Лабораторный образец цифровой системы динамического локального освещения.
Автор фотографии Е. А. Шабаев, 2023 г.

F i g. 1. Laboratory sample of a digital dynamic local lighting system.
The photo by E.A. Shabaev, 2023

К лабораторной установке (рис. 1) был подключен отдельный компактный светодиодный светильник [30] системы локального динамического освещения, закрепленный на подвесе и цифровой ДО на базе микросхемы ОРТ3001. Расстояние от светильника до воспринимающей поверхности датчика равно 0,5 м. На этом расстоянии светильник создает максимальную освещенность 51,4 лк. Диапазон изменения светового потока составляет от 0 до 100 %, КЦТ – от 2 660 до 5 640 К. Управление токами СИД теплого и холодного свечения осуществляется двумя ШИМ-сигналами с частотой 2 кГц и разрядностью 10 бит.

Функциональная схема исследуемой системы изображена на рисунке 2. Объектом регулирования (далее – ОР) в данной САР является клетка для содержания птицы с размещенным светодиодным светильником. Функцию задающего органа (далее – ЗО) выполняет ПЛК. Воспринимающим органом (далее – ВО) служит цифровой ДО. Светодиодный драйвер представляет собой регулирующий орган (далее – РО). Микроконтроллер (далее – МК) осуществляет функции преобразующих органов (далее – СО, ПО1, ПО2) и регулятора. ПО1 формирует ШИМ-сигналы управления, ПО2 производит фильтрацию сигнала датчика освещенности. Регулируемой величиной является освещенность E , создаваемая на дне кормушки. За основное возмущение принято изменение фоновой освещенности E_v в помещении. Величина E поддерживается на заданном уровне за счет изменения регулирующего воздействия I_D – токов в режиме ШИМ-управления, протекающих через светодиоды светильника. Задающим сигналом САР является заданный уровень освещенности на контрольной поверхности E_z .

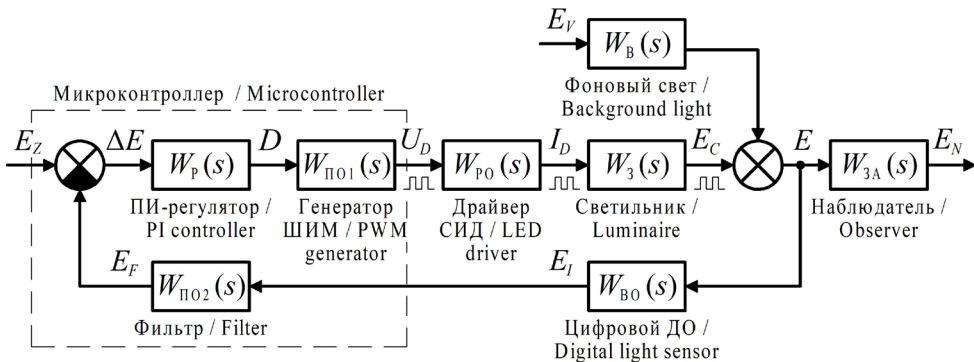


Р и с. 2. Функциональная схема цифровой САР освещенности
 F i g. 2. Functional diagram of digital ACS of lighting

Источник: здесь и далее в статье все изображения составлены авторами.
 Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

Исследуемая САР работает следующим образом. Контроль текущего уровня освещенности E производится датчиком освещенности, который на выходе формирует цифровой сигнал измеренной освещенности E_i и передает его через интерфейс I²C на МК платы управления. В МК производится сглаживание результатов измерений освещенности E_i цифровым фильтром и сравнение сигнала освещенности на выходе фильтра E_f с заданным значением E_z . В результате этого образуется сигнал рассогласования $\Delta E = E_z - E_f$. Заданное значение освещенности формирует ПЛК и передает его через интерфейс RS-485 в МК. Микроконтроллер по сигналу ΔE с учетом требуемого КЦТ оптического излучения, принятого закона управления и настроек регулятора вычисляет коэффициенты заполнения D ШИМ-импульсов и формирует соответствующие ШИМ-сигналы U_D напряжения. Данные сигналы поступают в драйвер СИД и осуществляют управление выходными транзисторами, используемыми для стабилизации и ШИМ-регулирования токов I_D через светодиоды светильников.

На основе функциональной схемы была составлена структурная схема цифровой САР освещенности (рис. 3). При этом приняты следующие допущения: квантование сигнала освещенности E_i по уровню ДО является несущественным; не учтено температурное изменение светового потока СИД; влияние температуры драйвера СИД на точность стабилизации тока СИД незначительно; выходная характеристика драйвера СИД является абсолютно линейной [31].



Р и с. 3. Структурная схема цифровой САР освещенности
 F i g. 3. Block diagram of digital ACS of lighting

Практическое функционирование исследуемой САР характеризуется широким диапазоном заданного уровня освещенности.

Выходная величина E_C (рис. 3) – освещенность, создаваемая светодиодами светильника в режиме ШИМ-токов. Передаточная функция наблюдателя $W_{3A}(s)$ добавлена в структурную схему для оценки качества регулирования освещенности E_N на контрольной поверхности с учетом особенностей зрительного аппарата человека.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР освещенности описываются следующими передаточными функциями и математическими выражениями.

Передаточная функция объекта регулирования по задающему воздействию для теплого и холодного канала свечения:

$$W_{3W}(s) = k_{EW}; \tag{7}$$

$$W_{3C}(s) = k_{EC}, \tag{8}$$

где s – оператор передаточной функции в преобразовании Лапласа.

Передаточные коэффициенты k_{EW} и k_{EC} светодиодного светильника для каналов теплого и холодного свечения:

$$k_{EW} = \frac{E_W}{I_{DW}} = \frac{E_{MAX}}{I_A(1+1/k_{WC})}; \tag{9}$$

$$k_{EC} = \frac{E_C}{I_{DC}} = \frac{E_{MAX}}{I_A(1+k_{WC})}, \tag{10}$$

где E_W и E_C – освещенности, создаваемые СИД теплого и холодного свечения, лк; I_{DW} и I_{DC} – действующие значения токов, протекающих через СИД теплого и холодного свечения, А; $E_{MAX} = 51,4$ лк – максимальная освещенность, создаваемая светильником; $I_A = 0,1$ А – амплитудное значение ШИМ-сигналов тока СИД; $k_{WC} = 0,9274$ – коэффициент соотношения освещенностей, создаваемых «теплым» и «холодным» СИД светильника.

Передаточная функция объекта регулирования по возмущению:

$$W_B(s) = 1. \tag{11}$$

Передаточная функция зрительного аппарата наблюдателя:

$$W_{3A}(s) = \frac{1}{T_{ZA}s + 1}, \tag{12}$$

где $T_{ZA} = 0,05–0,20$ с – постоянная времени [18].

Цифровой ДО производит измерение сигнала по следующему алгоритму: сначала выполняется суммирование измеряемой освещенности в течении времени интегрирования, затем определяется среднее значение и формируется конечный результат

измерений с учетом 12-битного разрешения сигнала. Уравнение, описывающее процесс измерения освещенности датчиком, может быть представлено в виде:

$$E_I = \frac{\sum E_J \tau_J}{\tau_{DO}}, \quad (13)$$

где $\tau_{DO} = 0,1$ с – время интегрирования цифрового ДО; τ_J – время преобразования сигнала АЦП, с; E_J – освещенность единичного измерения АЦП.

Также необходимо учитывать время, затрачиваемое на обработку данных измерений датчиком и их передачу через интерфейс I²C. Экспериментально установлено, что суммарно обработка и передача данных датчиком освещенности занимает $\tau_{ZDO} = 3,0041 \cdot 10^{-3}$ с.

Передаточная функция цифрового фильтра в линейном представлении описывается уравнением аperiодического звена первого порядка:

$$W_{\text{ПО2}}(s) = \frac{1}{T_F s + 1}, \quad (14)$$

где T_F – постоянная времени фильтра, с.

Сигнал рассогласования СО запишем как:

$$\Delta E = E_Z - E_F. \quad (15)$$

Передаточная функция цифрового ПИ-регулятора в линейном представлении выглядит как:

$$W(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = k_p \left(1 + \frac{k_I}{s} \right), \quad (16)$$

где k_I – интегральный коэффициент ПИ-регулятора.

Напряжения на выходах генераторов ШИМ-сигналов для управления СИД теплым и холодным свечением могут быть определены исходя из условий:

$$U_{DW} = \begin{cases} U_A, & \text{если } t = t_{ONW}; \\ 0, & \text{если } t = t_{OFFW}; \end{cases} \quad (17)$$

$$U_{DC} = \begin{cases} U_A, & \text{если } t = t_{ONC}; \\ 0, & \text{если } t = t_{OFFC}; \end{cases} \quad (18)$$

где $U_A = 5$ В – амплитуда напряжения ШИМ-сигналов управления; t_{ONW} и t_{ONC} – продолжительность импульса ШИМ-сигнала для СИД теплого и холодного свечения, с; t_{OFFW} и t_{OFFC} – продолжительность паузы ШИМ-сигнала для СИД теплого и холодного свечения, с.

$$t_{ONW} = \frac{1}{D_w f}; \quad (19)$$

$$t_{ONC} = \frac{1}{D_c f}; \quad (20)$$

$$t_{OFFW} = \frac{1}{f} - t_{ONW}; \quad (21)$$

$$t_{OFFC} = \frac{1}{f} - t_{ONC}, \quad (22)$$

где D_w и D_c – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала тока СИД теплого и холодного свечения; $f = 2000$ Гц – частота ШИМ-сигналов.

Коэффициенты D_w и D_c зависят от требуемой КЦТ оптического излучения. При моделировании необходимо учитывать период выполнения цикла программы, среднее значение которого составляет $\tau_{MC} = 1,021 \cdot 10^{-3}$ с (определено экспериментально).

Передаточные функции драйвера СИД теплого и холодного каналов свечения описываются выражениями:

$$W_{POW}(s) = k_U; \quad (23)$$

$$W_{POC}(s) = k_U, \quad (24)$$

где $k_U = 0,02$ А/В – передаточный коэффициент драйвера СИД.

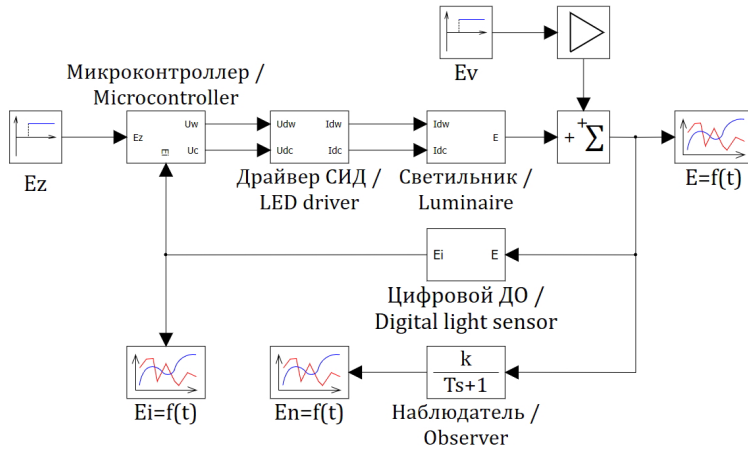
В экспериментах по снятию кривых переходных процессов на лабораторной установке в качестве задающего органа использовался ПК. Возмущение создавалось на программном уровне путем ступенчатого изменения коэффициентов заполнения ШИМ-сигнала токов СИД на величину, соответствующую E_{ν} . Опытные данные записывались на ПК, считывание данных с МК осуществлялось через интерфейс UART с помощью встроенного преобразователя UART<=>USB. Разработка экспериментальной программы для МК платы управления произведена с использованием программного обеспечения FLProg и ArduinoIDE на языках программирования FBD и Arduino C. Количество повторностей для каждого опыта с различными значениями E_z и E_{ν} равно 10. Для каждой повторности использовалось случайное смещение начала времени интегрирования ДО. При моделировании задавался шаг смещения начала времени интегрирования датчика 10 мс.

Результаты исследования. На основе структурной схемы САР освещенности (рис. 3) и описания ее основных элементов была составлена структурная схема моделирования САР в среде SimInTech (рис. 4).

В структурной схеме моделирования (рис. 4) блоки «ПЛК», «МК», «Драйвер СИД», «Светильник», «Цифровой ДО» являются субмоделями. Структура главной субмодели «МК» представлена на рисунке 5.

Блоки «Расчет D» и «Генератор ШИМ» (рис. 5) реализованы с использованием текстового языка программирования, встроенного в SimInTech. В блоке «Расчет D» происходит расчет коэффициентов заполнения ШИМ-сигналов токов СИД теплого и холодного свечения в зависимости от требуемой КЦТ оптического излучения. Моделирование проведено для КЦТ, равной 3779,57 К, которая соответствует максимальной освещенности, создаваемой светильником.

Блок «Генератор ШИМ» формирует ШИМ-сигналы напряжения в соответствии с уравнениями (17–22) для управления токами через СИД теплого и холодного свечения. Блоки «Задержка МК» учитывают задержку на период выполнения цикла программы.



Р и с. 4. Структурная схема моделирования цифровой САР в среде SimInTech
 F i g. 4. Simulation block diagram of digital ACS of lighting in the SimInTech program

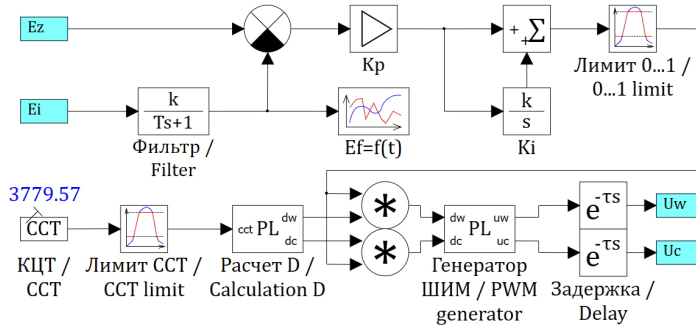


Рис. 5. Структура субмодели блока «Микроконтроллер»
 Fig. 5. Structure of the submodel of the «Microcontroller» block

В разработанной компьютерной модели цифровой САР освещенности в среде SimInTech дискретизация по уровню и времени ШИМ-сигналов напряжения реализуется с помощью блока «Генератор ШИМ» (рис. 5) и постоянного шага интегрирования, равного минимальной ширине импульса ШИМ напряжений.

Определение параметров обобщенного объекта регулирования. В соответствии с методами ЧНР, ВТИ и Копеловича для расчета параметров ПИ-регулятора требуются значения коэффициента передачи $k_{об}$, постоянной времени $T_{об}$ и запаздывания $\tau_{об}$ обобщенного объекта регулирования, который включает в себя все элементы САР освещенности, кроме задающего, сравнивающего и непосредственно регулятора. Эти параметры объекта могут быть рассчитаны аналитически или определены графически по кривым разгона.

Коэффициент передачи $k_{об}$ численно равен значению максимальной освещенности, создаваемой светильником, следовательно, $k_{об} = 51,4$. Параметр $T_{об}$ определяется постоянной времени фильтра, то есть $T_{об} = T_F = 0,125$ с. Общее запаздывание

в системе складывается из продолжительности интегрирования τ_{DO} цифрового ДО, задержки на обработку данных измерений и их передачу τ_{ZDO} , периодом выполнения цикла программы τ_{MC} : $\tau_{об} = \tau_{DO} + \tau_{ZDO} + \tau_{MC} = 1,04 \cdot 10^{-3}$ с.

Определение параметров ПИ-регулятора, оценка качества процесса регулирования. В соответствии с выбранными методами CHR, ВТИ и Копеловича по выражениям (1–6) произведены расчеты параметров ПИ-регулятора, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

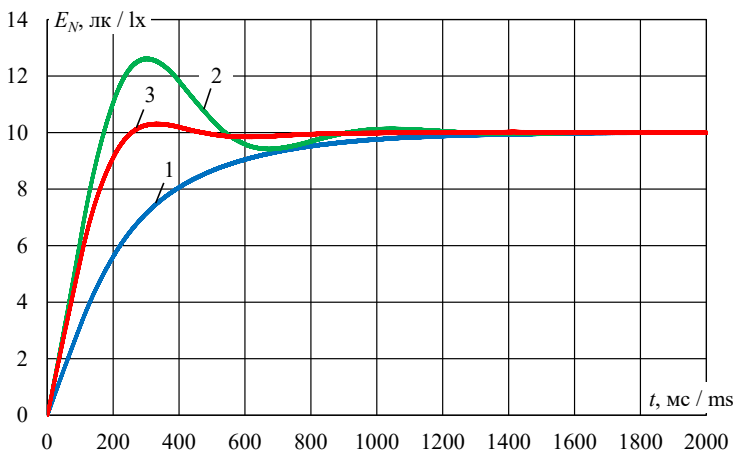
Параметры настройки ПИ-регулятора для разных методов расчета
PI controller tunings for different calculation methods

Метод / Method	k_p	T_i
CHR	$8,182 \cdot 10^{-3}$	150 мс / ms
ВТИ / VTI	$14,076 \cdot 10^{-3}$	100 мс / ms
Копеловича / Kopelovich	$14,027 \cdot 10^{-3}$	145,72 мс / ms

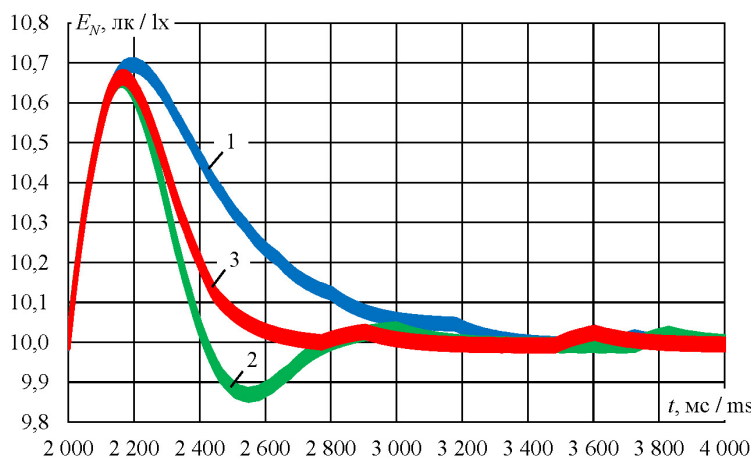
Источник: здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.

Source: Hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

Путем компьютерного моделирования были получены переходные процессы САР для настроек ПИ-регулятора, представленных в таблице 1. Кривые разгона для задающего воздействия $E_Z = 10$ лк соответствуют времени моделирования $t_M = 0-2$ с, для положительного и отрицательного возмущений – $t_M = 2-4$ с и $t_M = 4-6$ с. Первое ступенчатое изменение фоновой освещенности от 0 до 1 лк ($\Delta E_V = +1$ лк) произведено при $t_M = 2$ с, второе – от 1 до 0 лк ($\Delta E_V = -1$ лк) при $t_M = 4$ с. Результаты моделирования представлены на рисунках 6 и 7, где кривые 1, 2 и 3 соответствуют настройкам ПИ-регулятора, определенным по методам CHR, ВТИ и Копеловича.



Р и с. 6. Переходные процессы САР по задающему воздействию
 F i g. 6. Transient processes in ACS for a master control



Р и с. 7. Переходные процессы САР по возмущению
F i g. 7. Transient processes in ACS for a perturbation action

Визуальный анализ кривых переходных процессов САР, изображенных на рисунке 6, показывает, что наилучшее качество переходного процесса по задающему воздействию обеспечивают параметры ПИ-регулятора, полученные по методу Копеловича. Переходный процесс САР для параметров регулятора, вычисленных по методу СНР, обеспечивает аperiodический переходный процесс без перерегулирования, но имеет большое время регулирования. Переходный процесс при настройках регулятора, полученных по методу ВТИ, характеризуется значительным (более 25 %) перерегулированием.

Анализ кривых переходных процессов по возмущению (рис. 7) показывает, что параметры ПИ-регулятора, полученные по методу Копеловича, также обеспечивают лучшее качество регулирования.

За счет ШИМ-управления токами светодиодов освещенность E_N колеблется с амплитудой 17 мкк относительно среднего за период (0,5 мс) значения. На графиках переходных процессов, изображенных на рисунке 7 в увеличенном масштабе, это проявляется в увеличении толщины кривых 1, 2 и 3 на горизонтальных участках.

Рассчитанные показатели качества регулирования САР освещенности при настройках регулятора, полученных по методу Копеловича, удовлетворяют исходным требованиям (табл. 2).

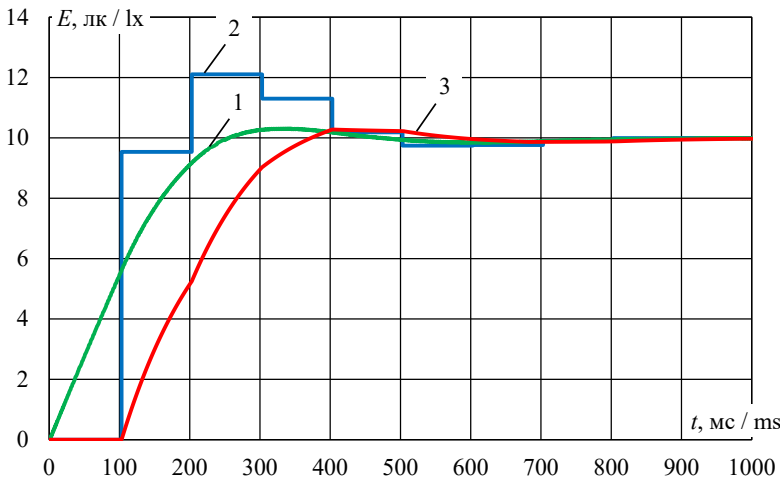
Оценка качества регулирования САР произведена для освещенности E_N , которая характеризует воздействие света на наблюдателя с учетом инерционности его зрительного аппарата при восприятии импульсного светового потока (кривая 1 на рис. 8).

Несмотря на существенную дискретизацию по времени сигнала $E_f = f(t)$ на выходе датчика освещенности, за счет равенства постоянных времени цифрового фильтра T_F и зрительного аппарата наблюдателя T_{Za} получен эффект идентичности кривых $E_f = f(t)$ и $E_N = f(t)$ со сдвигом по времени около 103 мс (рис. 8). Это позволяет САР более корректно формировать управляющее воздействие с помощью ПИ-регулятора, что способствует улучшению качества регулирования.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Показатели качества регулирования САР
Regulator performance indicators of ACS

Показатель качества / Regulator performance	Задающее воздействие / Master control	Возмущающее воздействие / Perturbation action
Статическая ошибка ΔE_{CT} , лк / Static error ΔE_{CT} , лк	≈ 0	≈ 0
Время регулирования t_p , мс / Control time t_p , ms	384,16	382,35
Перерегулирование σ , % / Overshoot σ , %	3,18	6,80
Число перерегулирований n / Number of overshoots n	1	1

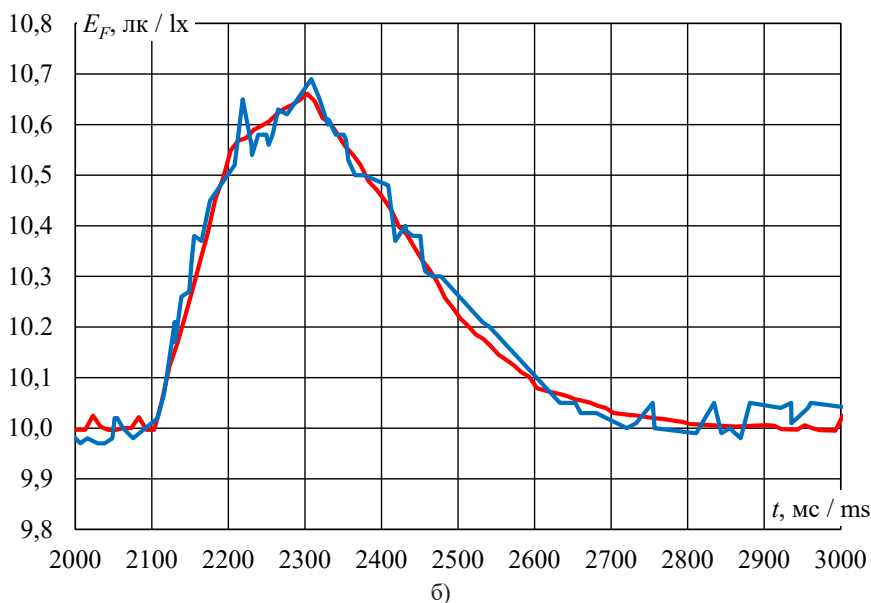
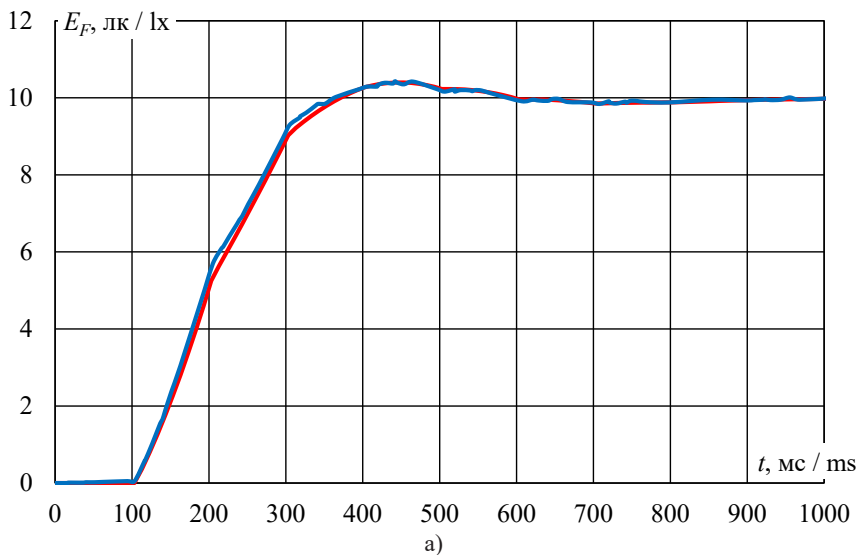


Р и с. 8. Переходные процессы в САР по задающему воздействию при $E_z = 10$ лк: 1 – E_N , 2 – E_p , 3 – E_F

F i g. 8. Transient processes in ACS for a master control for $E_z = 10$ lx: 1 – E_N , 2 – E_p , 3 – E_F

Экспериментальная проверка модели САР освещенности. С целью оценки достоверности результатов компьютерного моделирования САР освещенности проведен ряд натурных экспериментов по получению данных изменения во времени освещенности E_F на выходе цифрового фильтра при ступенчатых задающем и возмущающих воздействиях. Опыты проводились на лабораторной установке, изображенной на рисунке 1. При этом задающее и возмущающие воздействия создавались аналогично проведенному компьютерному моделированию, результаты которого отображены на рисунках 6 и 7.

Наглядное сравнение реального переходного процесса в САР с результатами компьютерного моделирования для $E_z = 10$ лк и КЦТ = 3779,57 К возможно путем сопоставления кривых, которые приведены на рисунке 9. Графики переходных процессов $E_F = f(t)$ построены по результатам обработки экспериментальных данных 10 опытов.



Р и с. 9. Переходные процессы в реальной САР (синяя линия) и в ее компьютерной модели (красная линия) для $E_z = 10$ лк:
а) по задающему воздействию; б) по возмущению при $\Delta E_v = +10\%$

F i g. 9. Transient processes in a real ACS (blue line) and in its computer model (red line) for $E_z = 10$ lx: a) for a master control; b) for a perturbation action equal to $\Delta E_v = +10\%$

Визуально результаты моделирования САР освещенности хорошо сопоставляются с кривыми разгона реальной системы (рис. 9), наблюдается очевидное сходство всех характерных участков кривых. Численная оценка совпадения

экспериментальных данных с результатами моделирования произведена по коэффициенту детерминации для продолжительности переходных процессов, равной 1 с по задающему воздействию и возмущениям. Сопоставление точек расчета производилось при одинаковом времени, в качестве исходных значений по времени принимались опытные данные реального переходного процесса, при необходимости результаты моделирования для заданного времени определялись интерполированием значений освещенностей для двух ближайших моментов времени. Совпадение кривых переходных процессов (рис. 9) на уровне $R^2 > 98\%$ (табл. 3) может служить оценкой высокой точности разработанной компьютерной модели САР освещенности.

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Оценка совпадения переходных процессов
Estimation of the coincidence of transient processes

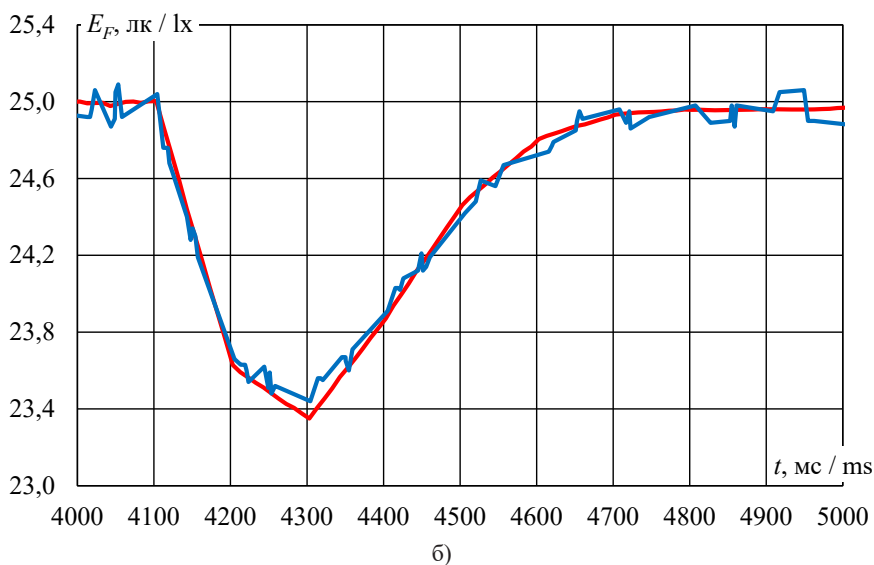
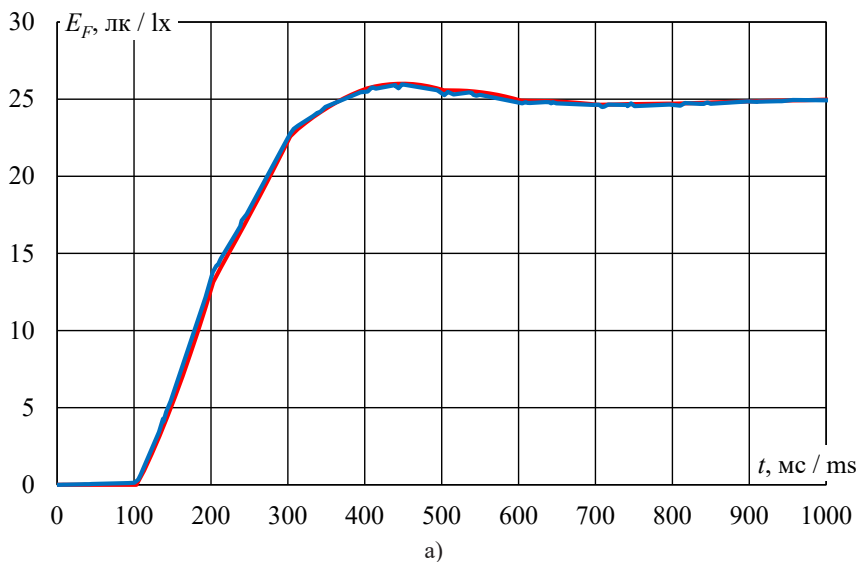
E_z , лк / lx	R^2 по задающему воздействию / R^2 for a master control	ΔE_v , лк / lx	R^2 по возмущению / R^2 for a perturbation
1	0,9887	+0,5	0,9357
		-0,5	0,9050
10	0,9993	+1,0	0,9828
		-1,0	0,9857
25	0,9995	+2,5	0,9913
		-2,5	0,9906

Дополнительно аналогичным образом произведена оценка точности модели САР освещенности для других значений E_z и ΔE_v (табл. 3; рис. 10, 11). Анализ данных, представленных в таблице 3, показывает, что с увеличением заданного значения уровня освещенности (рис. 10) коэффициент детерминации повышается.

Для $E_z = 1$ лк (рис. 11), несмотря на высокое значение коэффициента детерминации по задающему воздействию ($R^2 = 0,9887$), перерегулирование в реальной САР на 4,6 % выше относительно компьютерной модели. Переходный процесс по возмущению в реальной САР характеризуется более быстрым выходом на установившееся значение по сравнению с моделью.

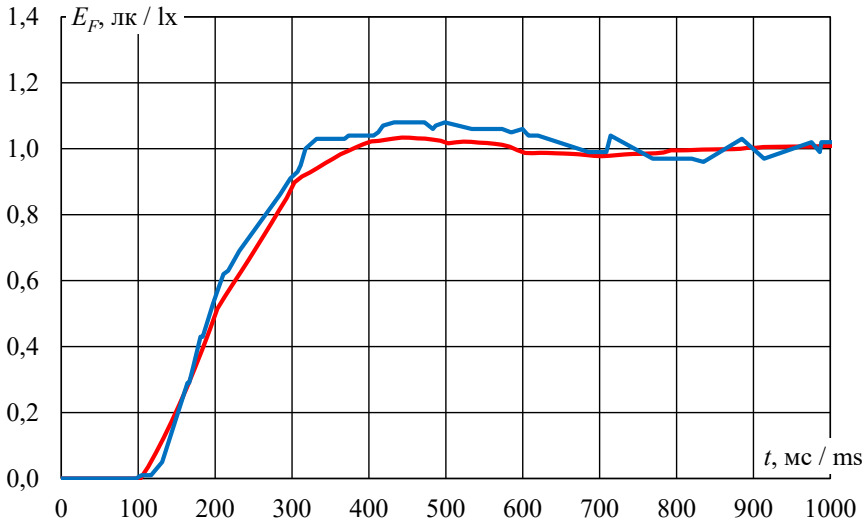
Ухудшение совпадения кривых переходных процессов в реальной САР и в ее компьютерной модели на малых уровнях заданной освещенности (рис. 11) связано с более существенным влиянием погрешностей измерений, помех и принятых в модели допущений. Несмотря на это, для $E_z = 1$ лк модель достаточно достоверно описывает переходные процессы в САР, а используемые настройки ПИ-регулятора обеспечивают требуемое качество регулирования освещенности.

Обсуждение и заключение. Разработанная модель цифровой САР освещенности и программное обеспечение SimInTech позволили провести исследование данной САР методом компьютерного моделирования.

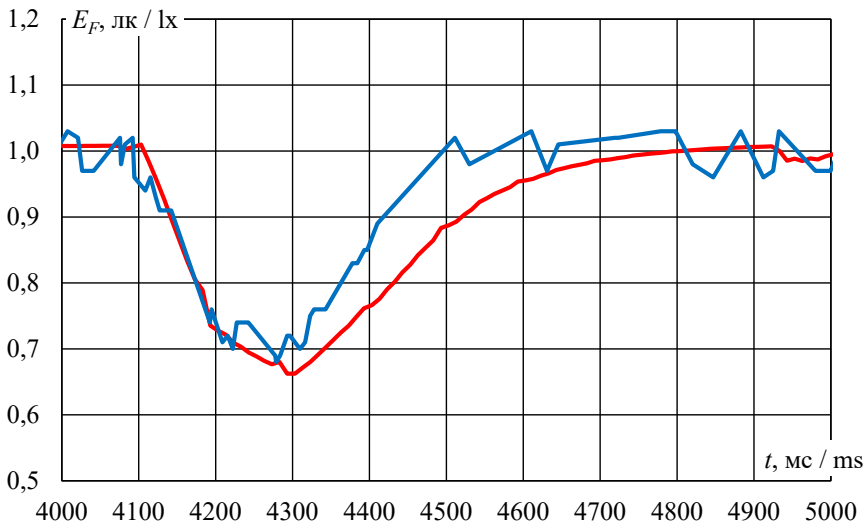


Р и с. 10. Переходные процессы в реальной САР (синяя линия) и в ее компьютерной модели (красная линия) для $E_z = 25$ лк: а) по задающему воздействию; б) по возмущению при $\Delta E_v = -10\%$

F i g. 10. Transient processes in a real ACS (blue line) and in its computer model (red line) for $E_z = 25$ lx: a) for a master control; b) for a perturbation action equal to $\Delta E_v = -10\%$



а)



б)

Р и с. 11. Переходные процессы в реальной САР (синяя линия) и в ее компьютерной модели (красная линия) для $E_z = 1$ лк: а) по задающему воздействию; б) по возмущению при $\Delta E_v = -0,5$ лк
 Fig. 11. Transient processes in a real ACS (blue line) and in its computer model (red line) for $E_z = 1$ lx: а) for a master control; б) for a perturbation action equal to $\Delta E_v = -0.5$ lx

Выбор методов нахождения рабочих настроек цифрового ПИ-регулятора следует производить с учетом наличия дискретизации сигналов по уровню и во времени цифровыми элементами САР освещенности. Для снижения влияния помех и более корректного формирования регулятором управляющего воздействия с учетом восприятия импульсного светового потока наблюдателем следует использовать

цифровой фильтр. Высокие показатели качества регулирования цифровой САР обеспечило применение ПИ-регулятора с настройками $k_p = 14,027 \cdot 10^{-3}$ и $T_I = 145,72$ мс, рассчитанными по методу Копеловича.

Сравнительная оценка переходных процессов по задающему и возмущающим воздействиям в реальной САР, реализованной на лабораторной установке, и в компьютерной модели данной системы позволяет сделать вывод о высокой точности разработанной модели и корректности выбора параметров моделирования в среде SimInTech. При малых уровнях заданной освещенности на функционировании САР ожидаемо больше сказываются помехи и сильнее проявляется влияние допущений, принятых при разработке компьютерной модели. Экспериментально установлено, что требуемое качество процесса регулирования САР обеспечивается для широкого диапазона заданной освещенности: от 1 до 25 лк.

Разработанная САР освещенности с ПИ-регулятором может быть использована в цифровой системе динамического локального освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы. Перспективно использование разработанной модели САР и компьютерного моделирования в среде SimInTech для уточнения оптимальных настроек ПИ- или ПИД-регулятора с помощью параметрической оптимизации при различных сочетаниях освещенности и КЦТ оптического излучения и создания адаптивной САР освещенности с изменяемыми настройками регулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусаев А. М. Влияние дневных и ночных ритмов на продуктивность японского перепела (*Jaropnicus coturnix L*) // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (34). С. 53–56. URL: https://vestnik.bsau.ru/netcat_files/vestnic/file/2015-34.pdf (дата обращения: 30.10.2023).
2. Significance of Light in Poultry Production: A Review / S. J. Patel [et al.] // *Advances in Life Sciences*. 2016. Vol. 5, Issue 4. P. 1154–1160. URL: <https://clck.ru/3Au9hy> (дата обращения: 30.10.2023).
3. Influence of LED Bulb on Reproductive and Production Performance of Different Poultry Species: A Review / O. M. Oso [et al.] // *World's Poultry Science Journal*. 2022. Vol. 78, Issue 2. P. 515–529. <https://doi.org/10.1080/00439339.2022.2044273>
4. Soliman F. N. K., El-Sabrou K. Light Wavelengths/Colors: Future Prospects for Broiler Behavior and Production // *Journal of Veterinary Behavior*. 2020. Vol. 36. P. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2019.10.014>
5. Деткова А. Е. Зоогиgienическая оценка параметров микроклимата содержания птицы родительского стада кросса Хайсекс Уайт // Молодежь и наука. 2018. № 6. С. 28. EDN: YADUNF
6. Lighting, Density, and Dietary Strategies to Improve Poultry Behavior, Health, and Production / K. El-Sabrou [et al.] // *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. Vol. 10, Issue 1. Article no. 2212. <https://doi.org/10.31893/jabb.22012>
7. Impact of Housing Environment on the Immune System in Chickens: A Review / T. Hofmann [et al.] // *Animals*. 2020. Vol. 10, Issue 7. Article no. 1138. <https://doi.org/10.3390/ani10071138>
8. Локальное светодиодное освещение – путь повышения эффективности птицеводства / В. И. Фисинин [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 6. С. 61–62. EDN: MMXNCU
9. Thomson A., Corscadden K. W. Improving Energy Efficiency in Poultry Farms through LED Usage: A Provincial Study // *Energy Efficiency*. 2018. Vol. 11. P. 927–938. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9613-0>
10. Шабаетв Е. А., Романовец М. М. Цифровая система динамического локального освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69, № 1 (46). С. 26–30. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-26-30>

11. Shabaev E. A., Romanovets M. M. Mathematical Models of Sunlight for Dynamic Lighting Systems of Agricultural Objects // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659. Article no. 012110. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012110>
12. Способ локального динамического освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы с моделированием естественной световой среды : патент 2797873 Российская Федерация / Шабаев Е. А., Романовец М. М. № 2022117323 ; заявл. 24.06.2022 ; опубл. 09.06.2023, Бюл. № 16. 7 с. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2797873C1/ru> (дата обращения: 30.10.2023).
13. Продуктивность кур при светодиодном освещении с изменяемой цветовой температурой / А. Ш. Кавтарашвили [и др.] // Птицеводство. 2017. № 3. С. 27–29. EDN: YLKCGV
14. Archer G. S. Color Temperature of Light-Emitting Diode Lighting Matters for Optimum Growth and Welfare of Broiler Chickens // Animal. 2018. Vol. 12, Issue 5. P. 1015–1021. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002361>
15. Дубровский А. А., Смирнова В. В. Использование светодиодного освещения с различной цветовой температурой при выращивании родительского стада птицы // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2020. № 4 (63). С. 188–195. URL: https://www.mgau.ru/science/journal/PDF_files/vestnik_4_2020.pdf (дата обращения: 30.10.2023).
16. Aldridge D. J., Scanes C. G., Kidd M. T. Performance and Preference of Broilers Provided Dual Light Warmth // Journal of Applied Poultry Research. 2021. Vol. 30, Issue 4. Article no. 100187. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100187>
17. Impact of Light Intensity or Choice of Intensity on Broiler Performance and Behavior / D. J. Aldridge [et al.] // Journal of Applied Poultry Research. 2022. Vol. 31, Issue 1. Article no. 100216. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100216>
18. Газалов В. С., Шабаев Е. А., Романовец М. М. Моделирование САР освещенности динамической системы освещения на RGB-светодиодах // АгроЭкоИнфо. 2019. № 2. 14 с. URL: https://agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2019/st_223_annot.html (дата обращения: 30.10.2023).
19. Мазуров В. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 3. Цифровые регуляторы и их настройка // Компоненты и технологии. 2003. № 6. С. 146–151. URL: <https://clck.ru/3AvWeU> (дата обращения: 30.10.2023).
20. Anuchin A. S. Calculation Techniques for Parameters of a Digital PI Controller in an Electrical Drive // Russian Electrical Engineering. 2014. Vol. 85. P. 290–297. <https://doi.org/10.3103/S1068371214050022>
21. Åström K. J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols Step Response Method for PID Control // Journal of Process Control. 2004. Vol. 14, Issue 6. P. 635–650. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.01.002>
22. Controller Tuning Method for Non-Linear Conical Tank System / G. Saravanakumar [et al.] // Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST). 2017. Vol. 1, Issue 2. P. 224–228. URL: <https://ssrn.com/abstract=2942425> (дата обращения: 30.10.2023).
23. Разработка методики определения оптимальных параметров настройки промышленных регуляторов / Т. А. Изосимова [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2020. № 3 (106). С. 5–20. URL: https://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1841#commentspost (дата обращения: 30.10.2023).
24. Metaheuristic Algorithms for PID Controller Parameters Tuning: Review, Approaches and Open Problems / S. B. Joseph [et al.] // Heliyon. 2022. Vol. 8, Issue 5. Article no. e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
25. Reinforcement Learning Approach to Autonomous PID Tuning / O. Dogru [et al.] // Computers & Chemical Engineering. 2022. Vol. 161. Article no. 107760. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107760>
26. Lolu S. J., Lolu G. D. Comparison of PID Tuning Methods for First Order Plus Time-Delay System // International Journal of Advance Research in Science and Engineering. 2018. Vol. 7, Issue 1. P. 36–47. URL: https://ijarse.com/images/fullpdf/1515747909_J1006.pdf (дата обращения: 30.10.2023).
27. Демин И. О., Саблина Г. В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия. 2020. № 1 (31). С. 174–181. URL: <https://jurnal.nips.ru/node/127> (дата обращения: 30.10.2023).

28. Мазуров В. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования // Компоненты и технологии. 2003. № 5 (31). С. 114–118. URL: <https://clck.ru/3AvfNy> (дата обращения: 30.10.2023).

29. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 2 // Современная электроника и технологии автоматизации. 2008. № 1. С. 86–99. URL: <https://www.cta.ru/articles/spravochnik/v-zapisnyuyu-knizhku-inzhenera/125043/> (дата обращения: 30.10.2023).

30. Шабаетв Е. А., Романовец М. М., Кулачинский В. А. Исследование нагрева светодиодов компактного светильника для системы локального освещения // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 1 (57). С. 78–86. https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_1_78-86

31. Шабаетв Е. А., Романовец М. М., Кулачинский В. А. Исследование многоканального высоковольтного светодиодного драйвера // Вестник НГИЭИ. 2023. № 4 (143). С. 67–78. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-4-67-78>

REFERENCES

1. Musayev A.M. Influence of Two Day and Two Night Rhythms on Productivity of Japanese Quail (*Japonicus Coturnix L.*). *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2015;(2):53–56. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://vestnik.bsau.ru/netcat_files/vestnic/file/2015-34.pdf (accessed 30.10.2023).

2. Patel S.J., Patel A.S., Patel M.D., Patel J.H. Significance of Light in Poultry Production: A Review. *Advances in Life Sciences*. 2016;5(4):1154–1160. Available at: <https://clck.ru/3Au9hy> (accessed 30.10.2023).

3. Oso O.M., Metowogo K., Oke O.E., Tona K. Influence of LED Bulb on Reproductive and Production Performance of Different Poultry Species: A Review. *World's Poultry Science Journal*. 2022;78(2):515–529. <https://doi.org/10.1080/00439339.2022.2044273>

4. Soliman F.N.K., El-Sabrou K. Light Wavelengths/Colors: Future Prospects for Broiler Behavior and Production. *Journal of Veterinary Behavior*. 2020;36:34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2019.10.014>

5. Detkova A.E. Hygienic Evaluation of the Microclimate of the Poultry Parent Stock of Cross Hajseks White. *Youth and Science*. 2018;(6):28. EDN: YADUNF

6. El-Sabrou K., El-Deek A., Ahmad S., Usman M., Dantas M.R.T., Souza-Junior J.B.F. Lighting, Density, and Dietary Strategies to Improve Poultry Behavior, Health, and Production. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10(1):2212. <https://doi.org/10.31893/jabb.22012>

7. Hofmann T., Schmucker S., Bessei W., Grashorn M., Stefanski V. Impact of Housing Environment on the Immune System in Chickens: A Review. *Animals*. 2020;10(7):1138. <https://doi.org/10.3390/ani10071138>

8. Fisinin V.I., Kavtarashvili A.Sh., Novotorov E.N., Gladin D.N. Light-Emitting Diode Illumination – Morrow in Poultry Farming. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2011;(6):61–62. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: MMXNCU

9. Thomson A., Corscadden K.W. Improving Energy Efficiency in Poultry Farms through LED Usage: A Provincial Study. *Energy Efficiency*. 2018;11:927–938. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9613-0>

10. Shabaev E.A., Romanovets M.M. Digital System of Dynamic Local Lighting for Poultry Cages. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2022;69(1):26–30. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-26-30>

11. Shabaev E.A., Romanovets M.M. Mathematical Models of Sunlight for Dynamic Lighting Systems of Agricultural Objects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;659:012110. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012110>

12. Shabaev E.A., Romanovets M.M. [Method for Local Dynamic Lighting of Cages for Poultry with Simulation of Natural Light Environment]. Patent 2,797,873 Russian Federation. 2023 June 09. 7 p. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2797873C1/ru> (accessed 30.10.2023). (In Russ.)

13. Kavtarashvili A.Sh., Novotorov E.N., Gusev V.A., Gladin D.M. [The Productive Performance of Layers under LED Lighting with Variable Color Temperature]. *Ptitsvodstvo*. 2017;(3):27–29. (In Russ.) EDN: YLKCGV

14. Archer G.S. Color Temperature of Light-Emitting Diode Lighting Matters for Optimum Growth and Welfare of Broiler Chickens. *Animal*. 2018;12(5):1015–1021. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002361>
15. Dubrovsky A., Smirnova V. The Use of LED Lighting with Different Color Temperatures when Raising a Parent Flock of Poultry. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2020;(4):188–195. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_4_2020.pdf (accessed 30.10.2023).
16. Aldridge D.J., Scanes C.G., Kidd M.T. Performance and Preference of Broilers Provided Dual Light Warmth. *Journal of Applied Poultry Research*. 2021;30(4):100187. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100187>
17. Aldridge D.J., Owens C.M., Maynard C., Kidd M.T., Scanes C.G. Impact of Light Intensity or Choice of Intensity on Broiler Performance and Behavior. *Journal of Applied Poultry Research*. 2022;31(1):100216. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100216>
18. Gazalov V.S. Shabaev E.A., Romanovets M.M. [Modeling of Automatic Illumination Control System of Dynamic Lighting System with RGB-LED Lighting]. *AgroEcoInfo*. 2019;(2):14. (In Russ.) Available at: https://agroeco.info.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st_223.doc (accessed 30.10.2023).
19. Mazurov V. [Automatic Regulators in Control Systems and Their Tuning. Part 3. Digital Controllers and Their Setting]. *Components & Technologies*. 2003;(6):146–151. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3AvWeU> (accessed 30.10.2023).
20. Anuchin A.S. Calculation Techniques for Parameters of a Digital PI Controller in an Electrical Drive. *Russian Electrical Engineering*. 2014;85:290–297. <https://doi.org/10.3103/S1068371214050022>
21. Åström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols Step Response Method for PID Control. *Journal of Process Control*. 2004;14(6):635–650. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.01.002>
22. Saravanakumar G., Dinesh S., Preteep S., Sridhar P., Suresh M. Controller Tuning Method for Non-Linear Conical Tank System. *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*. 2017;1(2):224–228. Available at: <https://ssrn.com/abstract=2942425> (accessed 30.10.2023).
23. Izosimova T.A., Mikhailova O.V., Maksimova M.V., Galynya A.V. Development of the Methodology for Determining Optimal Setting Parameters of Industrial Regulators. *Bulletin NGIE*. 2020;(3):5–20. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42593977> (accessed 30.10.2023).
24. Joseph S.B., Dada E.G., Abidemi A., Opeoluwa Oyewolaet D., Khammas B.M. Metaheuristic Algorithms for PID Controller Parameters Tuning: Review, Approaches and Open Problems. *Heliyon*. 2022;8(5):e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
25. Dogru O., Velswamy K., Ibrahim F., Wu Y., Sundaramoorthy A.S., Huang B., et al. Reinforcement Learning Approach to Autonomous PID Tuning. *Computers & Chemical Engineering*. 2022;161:107760. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107760>
26. Lolu S.J., Lolu G.D. Comparison of PID Tuning Methods for First Order Plus Time-Delay System. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2018;7(1):36–47. Available at: https://ijarse.com/images/fullpdf/1515747909_J1006.pdf (accessed 30.10.2023).
27. Demin I.O., Sablina G.V. Research of Methods for Setting Parameters of the PID Controller. *Automation & Software Engineering*. 2020;(1):174–181. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47420113> (accessed 30.10.2023).
28. Mazurov V. [Automatic Regulators in Control Systems and Their Tuning. Part 2. Automatic Regulators and Their Adjustment. General Information About Industrial Control Systems]. *Components & Technologies*. 2003;(5):114–118. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3AvfNy> (accessed 30.10.2023).
29. Denisenko V. [PID Controllers: Implementation Issues. Part 2]. *Sovremennaya Elektronika i Tekhnologii Avtomatizatsii*. 2008;(1):86–99. (In Russ.) Available at: <https://www.cta.ru/articles/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/125043/> (accessed 30.10.2023).
30. Shabaev E.A., Romanovets M.M., Kulachinskii V.A. The Research of the Heating of LEDs of a Compact Luminaire for a Local Lighting System. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15(1):78–86. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_1_78-86
31. Shabaev E.A., Romanovets M.M., Kulachinskiy V.A. Research of the Multichannel High-Voltage LED Driver. *Bulletin NGIEI*. 2023;(4):67–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-4-67-78>

Об авторах:

Шабает Евгений Адимович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, sea007@rambler.ru

Романовец Михаил Михайлович, ассистент кафедры эксплуатации энергетического оборудования и электрических машин Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1945-1744>, romanovetsm@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. А. Шабает – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и выводов, разработка компьютерной модели, доработка текста.

М. М. Романовец – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов, разработка компьютерной модели, литературный анализ, формирование первоначального варианта текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 30.11.2023; поступила после рецензирования 22.01.2024; принята к публикации 07.02.2024

About the authors:

Evgeniy A. Shabaev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of Chair of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, sea007@rambler.ru

Mikhail M. Romanovets, Assistant of Chair of Operation of Power Installations and Electrical Machines, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1945-1744>, romanovetsm@yandex.ru

Authors contribution:

Е. А. Шабает – scientific guidance, formulation of the main concept of the study, developing a computer model, formation of conclusions, revision of the text.

М. М. Романовец – experimental research, processing experimental results, developing a computer model, carrying out literary analysis, preparing the initial version of the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 30.11.2023; revised 22.01.2024; accepted 07.02.2024