



eISSN 2311-2468
Том 9, № 14. 2021
Vol. 9, no. 14. 2021

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



ШИШОВ О. В., БЕЗБОРОДОВ Е. С., ПУГАЧЕВ А. А.

**ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОТЛАДКЕ ПРОГРАММ РАБОТЫ АСУ ТП**

Аннотация. Рассматриваются различные подходы к реализации имитационных моделей технологических процессов и объектов, а также особенности их применения при отладке программного обеспечения контроллеров автоматизированных систем управления. Предлагается использовать программные модели, реализованные на базе программируемых логических контроллеров.

Ключевые слова: имитационные модели, программируемые логические контроллеры, технологический процесс.

SHISHOV O. V., BEZBORODOV E. S., PUGACHOV A. A.

**APPLICATION OF VARIOUS FORMS OF SIMULATION MODELING
WHEN DEBUGGING ACS OPERATION PROGRAMS**

Abstract. Various approaches to simulation models of technological processes and objects, as well as the peculiarities of their application when debugging the software of controllers of automated control systems, are considered. It is proposed to use software models based on programmable logic controllers.

Keywords: simulation models, programmable logic controllers, technological process.

Огромную роль в организации учебного процесса играют активные формы обучения. На сегодняшний день одной из них выступает имитационное моделирование. Имитация – это постижение сути явления, без применения экспериментов на реальном объекте. В основе имитационных учебных технологий лежит воспроизведение в условиях обучения с той или иной мерой адекватности процессов, происходящих в реальной системе. Построение моделей и организация работы с ними дают возможность отразить в учебном процессе различные виды профессионального контекста и формировать профессиональный опыт по самому широкому спектру направлений человеческой деятельности.

Обучение с использованием имитационных образовательных технологий предполагает отличную от привычной логику познавательного процесса: не от теории к практике, а от формирования нового опыта к его теоретическому осмыслению. Модель можно «проиграть» во времени, как для одного испытания, так и заданного их множества. Работа с имитационной моделью помогает более полно изучить объекты, чем во время реального эксперимента (на практике мы в принципе не сможем создать все ситуации, чтобы исследовать свойства и поведение объекта). Модель невозможно сломать. Это позволяет

строить эксперименты более смело и широко, выявлять «крайние» случаи ее поведения. В целом это способствует более быстрому и качественному формированию профессиональных компетенций.

В полной мере это касается дисциплин, посвященных изучению вопросов построения систем управления технологическими процессами. В рамках этих дисциплин изучаются теоретические основы управления, технологии конкретных производств, а также технические средства, которые используются при построении систем автоматизации. Создание современных сложных и многофункциональных систем управления все чаще ведется на уровне системотехники – с использованием типовых готовых технических средств, в качестве центрального ядра которых, почти без исключения, сегодня выступают программируемые логические контроллеры (ПЛК). В свою очередь, технология использования ПЛК, как готовых типовых аппаратных средств, предполагает, что основной объем работ при создании проектов автоматизации сводится к разработке их программного обеспечения. Таким образом в учебные планы технических учебных заведений соответствующего профиля вводятся курсы по изучению языков их программирования, проблемам разработки соответствующего программного обеспечения.

Немаловажным этапом создания программ является их отладка. Проверка правильности их работы отчасти может сводиться к выполнению некоторого множества чисто вычислительных примеров, но т. к. речь идет о программах управления техническими средствами, то безусловно лучшим вариантом проверки их работоспособности была бы загрузка в действующее оборудование и комплексный запуск работы программных и аппаратных средств. Однако, в рамках проведения учебного процесса, это обычно невозможно из-за отсутствия свободного доступа к технологическому оборудованию. А если такой доступ и есть, то для проведения подобных испытаний нужно обладать достаточной степенью уверенности в адекватности работы созданного программного обеспечения, чтобы исключить выход из строя аппаратных средств если не будет обеспечена полная корректность управления ими. Именно в этом случае на помощь приходят модели технологического оборудования или процессов.

При работе с ПЛК – при создании и отладке для них программ – в простейшем случае имитировать работу дискретных датчиков можно с помощью механических ключевых элементов (кнопок, переключателей), работу аналоговых датчиков – с помощью регулируемых источников напряжения и тока. Учащийся в необходимом порядке должен управлять ими вручную. Формирование дискретных и аналоговых управляющих сигналов на выходах датчиков можно наблюдать с помощью простейших индицирующих устройств

(ламп, цифровых индикаторов). Структура учебного стенда, реализованная исходя из такого подхода, и включающая ПЛК и другие основные компоненты, показана на рисунке 1.



Рис. 1. Структура учебного стенда, включающая ПЛК и компоненты, формирующие и отображающие дискретные и аналоговые входные/выходные сигналы.

Главным недостатком такого подхода имитации технологического процесса (формирования и отображения дискретных и аналоговых входных/выходных сигналов) является отсутствие наглядности работы технологической системы и невозможности формирования испытательных сигналов в реальном масштабе времени. Единственным достоинством – простота организации учебного стенда и работы с ним. Последнее в конечном итоге обуславливает повсеместность использования такого подхода к имитации технологического процесса и широко используется на этапе освоения технических средств автоматизации и начального знакомства с соответствующими языками программирования.

Однако можно создавать модели технологических объектов, которые могут представлять собой в буквальном смысле уменьшенные копии действующего оборудования. Если реализовать и использовать такие модели получается, то это самый наглядный подход для проведения «испытаний». Контроллер, для которого написана программа управления объектом, имеет все средства для того чтобы быть подключенным к датчикам и исполнительным устройствам такой модели. Пример такой модели, демонстрирующей работу конвейера, показан на рисунке 2.

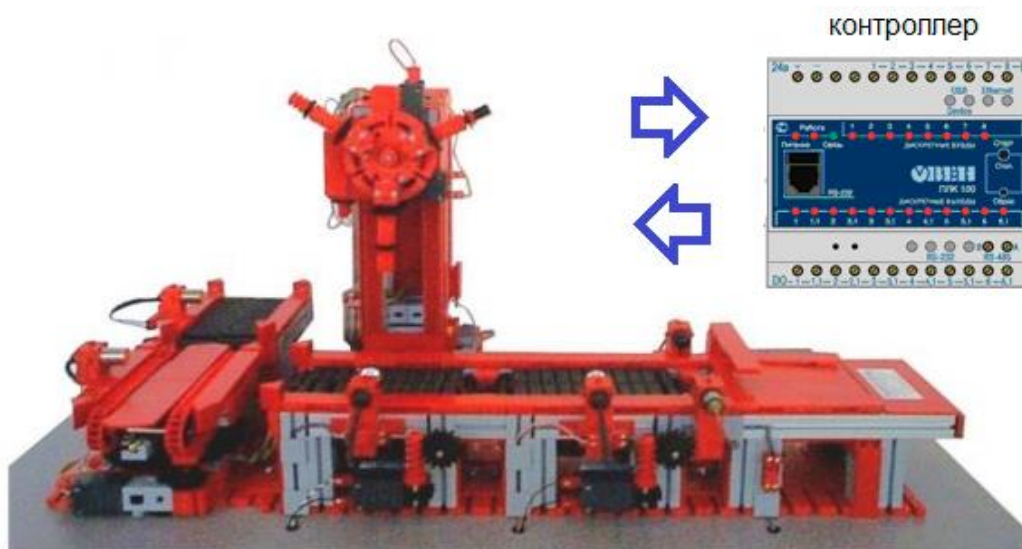


Рис. 2. Модель конвейера, представляющая его уменьшенную копию.

Такие модели очень хорошо отражают общий порядок работы оборудования. Они прекрасно иллюстрируют работу с дискретными датчиками и исполнительными устройствами. Вместе с тем, многие их параметры обычно очень далеки от значений параметров практических объектов – например, коэффициенты пересчета энкодеров, постоянные времени регуляторов. Это не исключает знакомство с применяемыми принципами управления, но не может демонстрировать типовые параметры объектов и реальные значения многих настроек для управления ими. А главное – механическая прочность и надежность таких моделей обычно достаточно низкая, особенно в условиях, когда нельзя исключать использование в «испытаниях» метода проб и ошибок.

Все это «заставляет» работать с виртуальными моделями, реализуемыми средствами компьютерной техники. Модели при этом являются программными. При использовании таких моделей технологический процесс или отдельный его этап (объект регулирования) описывается аналитически. Создание программы и ее отладка при этом замыкаются на персональном компьютере проектировщика. Модель формирует во времени значения параметров процесса и передает их в отлаживаемое программное обеспечение. В свою очередь это программное обеспечение формирует ответную реакцию, которая воздействует на модель. Периодически производится оценка расхождения поведения модели от необходимого. Развитая система визуализации персонального компьютера легко позволяет на экране дисплея отражать значения параметров процесса, формировать (в том числе трехмерные) изображения объекта, что особенно полезно для наглядности работы автоматизируемой установки, когда в ней есть движущиеся механические части (рис. 3).

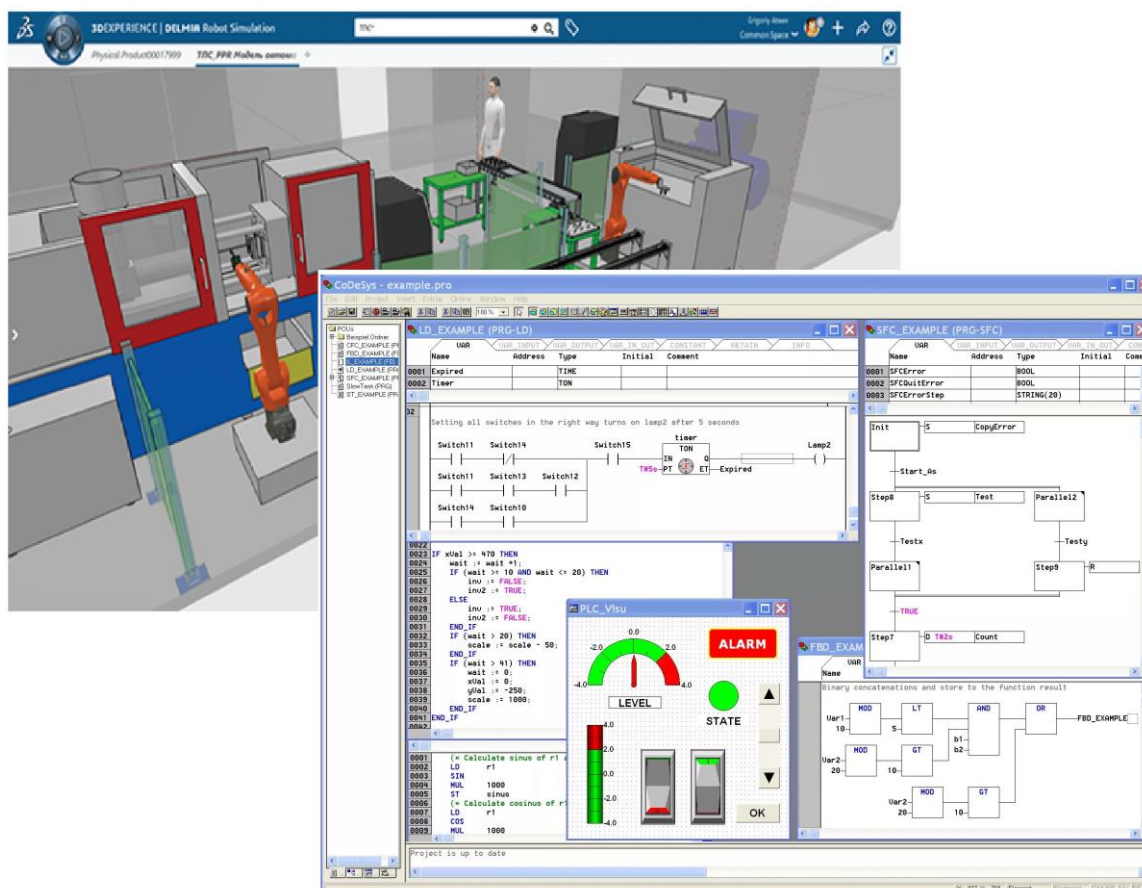


Рис. 3. Виртуальная модель технологического объекта
и представление программы его работы на экране персонального компьютера.

Однако при использовании компьютерных моделей возникают сложности проверки работы системы в реальном масштабе времени, учете различного рода временных параметров (задержек, согласованности работы механизмов и т. п.). Появляются сложности сочленения пакетов разработки программ для ПЛК с пакетами визуализации. Программы для ПЛК при ее отладке хочется запускать в самом контроллере, для того чтобы результат ее работы наблюдать в реальном масштабе времени. Подключение контроллера к персональному компьютеру по сети этого сделать не позволяет. А другие способы передачи/приема сигналов от ПЛК к компьютеру в реальном масштабе времени требуют сложной и дорогой аппаратной базы. Все в целом это существенно ограничивает применение комплекса «программа в ПЛК – модель в компьютере».

Анализ того, какие вычислительные средства могут применяться при реализации модели, привел к тому, что был предложен подход, в рамках которого программная модель реализовывается также в ПЛК. Т. е. предлагается использовать комплекс из двух контроллеров – в одном реализуется «программа в ПЛК», а в другом «модель в ПЛК». При этом обмен сигналами между контроллерами осуществляется штатными для них средствами

дискретного и аналогового ввода/вывода. В учебной лаборатории это означает, что один учебный стенд с ПЛК работает в связке с другим таким же стендом. Большинство учебных стендов по изучению типовых средств, используемых для построения современных систем управления, кроме ПЛК включают, как правило, еще и средства визуализации – операторные панели. При необходимости управление работой программой работы первого контроллера в рассматриваемом комплексе ведется с помощью операторной панели первого стенда. Операторная панель на втором стенде используется для представления (визуализации) работы модели.

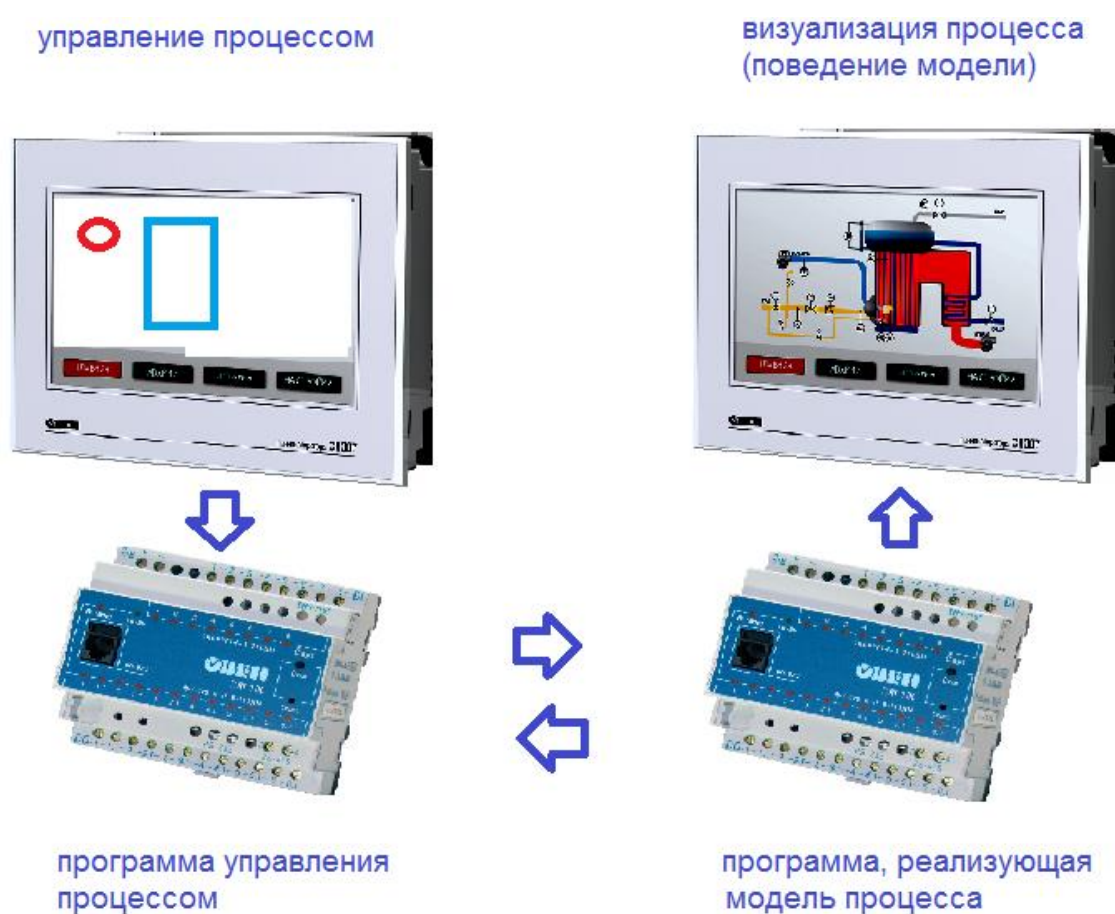


Рис. 4. Роль контроллера и операторной панели в системе управления и в эмитационной модели.

Программа управления на первом ПЛК и программа, реализующая модель на втором ПЛК, должны выполняться циклически. Для наблюдения работы управляющей программы в реальном масштабе времени цикл работы модели должен быть, по крайней мере не больше цикла управляющей программы. В большей степени это может быть критичным при реализации законов регулирования и в меньшей степени при работе с объектами, где используется логическое дискретное управление, т. е. в случае, когда модель реализуется в

дискретно-событийной форме. Такая модель требует меньших вычислительных ресурсов. Она отражает тот или иной процесс как хронологическую последовательность действий или событий, не требуя проводить их аналитическое описание.

Наиболее сложным при реализации модели является создание такой ее программной реализации, которая позволяла бы не просто фиксировать отклонение ее поведения от желаемого, но и указывать причины этого отклонения, чтобы учащемуся были понятны его ошибки. Желательно, чтобы ошибки в управлении объектом максимально наглядно отражались на системе визуализации. На данный момент, почти все операторные панели, как элементы визуализации, поддерживают анимацию, что позволяет на их экране достаточно наглядно отражать течение процесса. Однако панели малопроизводительны, что заставляет упрощать визуализацию и оставлять анимацию только функционально значимых объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 365 с.
2. Шишов О. В. Современные средства АСУ ТП. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 532 с.

БАТЫРКАНОВ Ж. И., КАДЫРКУЛОВА К. К., МАМАТОВ Д. Н.
СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ
ПО ПРЕДПИСАННЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

Аннотация. Приведены новые алгоритмы синтеза законов управления движением управляемого объекта по заданной предписанной траектории. Рассматриваются два варианта синтеза – с использованием аналитического описания траектории движения и табличного, проиллюстрированные на модельных примерах. Результаты моделирования показали конструктивность и высокую эффективность процедур синтеза.

Ключевые слова: предписанная программа (траектория), закон управления, объект управления, вектор невязки, вектор состояния, конечно-разностное уравнение.

BATYRKANOV J. I., KADYRKULOVA K. K., MAMATOV D. N.
SYNTHESIS OF LAWS OF MOVEMENT CONTROL
OF OBJECTS ALONG PRESCRIBED TRAJECTORIES

Abstract. New algorithms for the synthesis of control laws for the implementation of the motion of a controlled object along a given prescribed trajectory are presented. Two variants of synthesis are considered, using an analytical description of the trajectory of motion and tabular description, illustrated with model examples. The simulation results showed the constructiveness and high efficiency of the synthesis procedure.

Keywords: prescribed program (trajectory), control law, controlled object, residual vector, condition vector, finite difference equation.

В различных практических областях ставятся задачи по обеспечению движения объекта по предписанным траекториям. Это задачи управления движением рабочего органа манипулятора, лазерным лучом, промышленными роботами, рабочим органом 3D-принтера, квадрокоптерами и т. д. Проблемы синтеза законов управления предписанным движением, на данное время до конца не решены, это связано с трудностями при рассмотрении многомерных, нелинейных систем, а также с трудностями аналитического описания предписанных траекторий движения. В большинстве случаев на практике, например, при построении систем управления с промышленными роботами или применения 3D-принтеров, предписанную траекторию движения описать аналитически очень сложно. В этом случае используется подход синтеза на основе табличного задания предписанной траектории движения.

Синтез законов управления в случаях задания предписанной траектории движения в аналитической форме. Рассмотрим объект, описываемый математической моделью в виде

$$\dot{x} = F(x) + G(x)u, \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор состояния;

$u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ – вектор управления;

$F(x)$ – в общем случае нелинейная вектор-функция;

$G(x)$ – матрица, элементы которой – нелинейные функции от “ x ”.

Данная структура модели включает в себя и случай линейного объекта:

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

где A, B – числовые матрицы.

Предписанная траектория движения задаётся в виде системы аналитических выражений:

$$\Psi_r(x, t) = 0, \quad r = \overline{1, s}. \quad (2)$$

Назначая далее требуемый закон отработки ошибки выполнения программы движения в виде

$$\frac{d\delta_r}{dt} = R_r(\delta, x, t), \quad R_r(0, x, t) = 0, \quad \delta_r = \Psi_r(x, t) \neq 0, \quad (3)$$

синтезируется искомый закон управления из условия обеспечения $\delta_r \rightarrow 0$ в виде

$$U = \sum_{i=1}^s C_i G^T(x) \frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, \quad (4)$$

где коэффициенты $C_i, r = \overline{1, s}$ определяется из следующей системы:

$$\sum_{j=1}^s C_j (G^T(x) \frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, G^T(x) \frac{\partial \Psi_j}{\partial x}) = R_i - \left(\frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, F(x) \right) - \frac{\partial \Psi_i}{\partial t}, \quad i = \overline{1, s}; \quad (5)$$

а искомый вектор управления существует при условии

$$\text{rank} \left(G(x) : \sum_{i=1}^s C_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial x} \right) = \text{rank} G(x). \quad (6)$$

Если данное условие не выполняется, то это говорит о невозможности осуществления движения управляемой системы по заданной (предписанной) траектории.

Пример синтеза алгоритмов осуществления предписанной траектории. В качестве примера рассмотрим управляемый объект, который описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2 + u_1; \\ \dot{x}_2 = x_3; \\ \dot{x}_3 = u_2; \end{cases} \quad (7)$$

или

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (8)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Поставим задачу осуществления движения системы по траектории, описываемой системой уравнений

$$\begin{cases} \psi_1(x_1, x_2, x_3, t) = x_1 + x_2 + x_3 - 1 = 0; \\ \psi_2(x_1, x_2, x_3, t) = x_1 - 2x_2 - 3x_3 - 5 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Для решения задачи синтеза предварительно выясним вопрос линейной независимости векторов $B^T \cdot \frac{d\psi_i}{dx}$. Для этого определим

$$B^T \cdot \frac{d\psi_1}{dx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad B^T \cdot \frac{d\psi_2}{dx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ -3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix}.$$

Согласно [1] закону управления (4), имеем выражения искомых законов

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{16}(12r_1 + 4r_2 + 16x_2 - 4x_3); \\ u_2 = \frac{1}{16}(4r_1 - 4r_2 - 12x_3). \end{cases} \quad (10)$$

Моделирование замкнутой системы управления с помощью ППП MATLAB.

Уравнение замкнутой системы исходя из (7) и (10) определяется в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{4} \cdot x_2; \\ \dot{x}_2 = x_3; \\ \dot{x}_3 = -\frac{12}{16} \cdot x_3. \end{cases} \quad (11)$$

Моделирование осуществляется на основе системы (11). На рисунке 1 показана модель, выполненная в пакете Simulink. Результаты моделирования показаны на рисунке. 2.

Таким образом, синтезированный закон обеспечивает движение системы по предписанной траектории, заданной в виде системы уравнений (9). Физическая реализация полученных синтезированных функций U_1, U_2 не вызывает никаких затруднений.

Модельный пример синтеза адаптивного закона управления программным движением. Пусть объект управления описывается системой

$$\dot{X} = ax + vu + \Delta ax, \quad (12)$$

где, $a = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$; $v = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$; $\Delta a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ – параметрические возмущения.

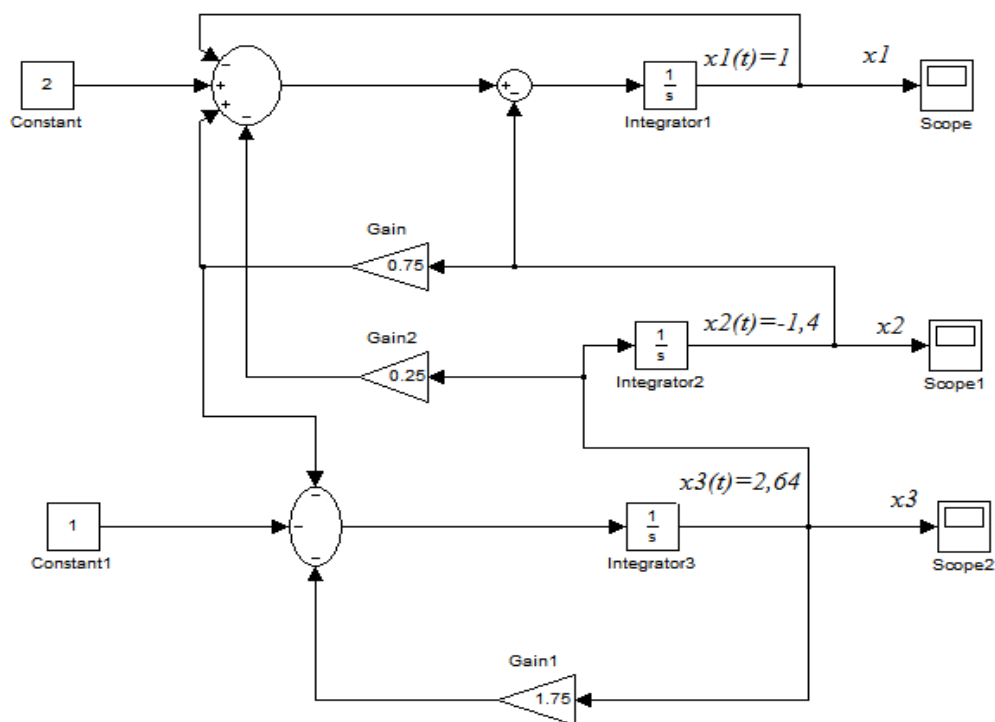


Рис. 1. Моделирование замкнутой системы управления в Simulink.

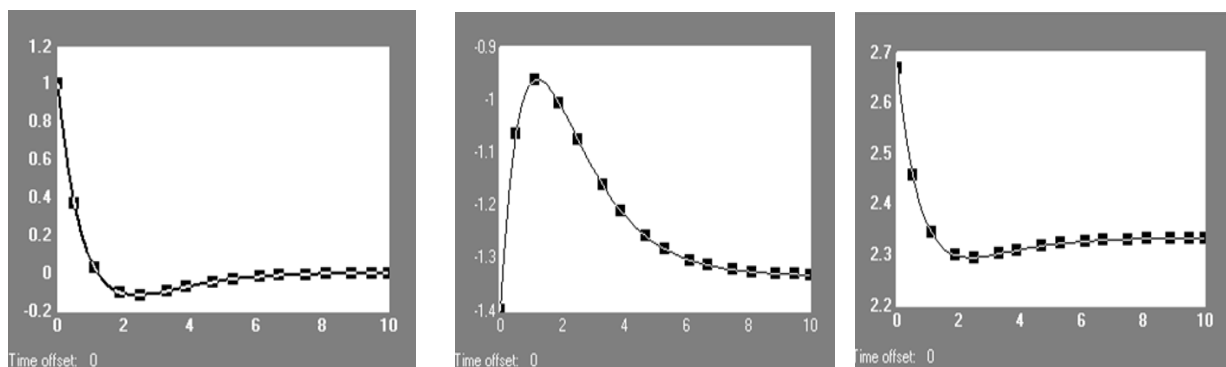


Рис. 2. Результаты моделирования для $x_1(t)$, $x_2(t)$ $x_3(t)$.

Предписанная программа движения описывается гармоническим законом

$$X(t) = A \sin \omega t \quad \text{или} \quad \psi(x_1, x_2) = x_1^2 + \frac{x_2^2}{\omega^2} - A^2 = 0. \quad (13)$$

$U_{\text{пр}}$ строится в виде:

$$U_{\text{пр}} = (a(x) \cdot \psi(x, t) - 2x_1x_2) \frac{\omega^2}{2x_2}.$$

Окончательно уравнение замкнутой системы управления с учётом структуры регулятора вида

$$U = U_{\text{пр}} - Cx, \quad (14)$$

где C – матрица параметрических возмущений,

представится в виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + a_{11}x_1 + a_{12}x_2; \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 - \omega^2 \left[x_1 + a_0 \left(x_1^2 + \frac{x_2^2}{\omega^2} - A^2 \right) x_2 \right] - C_1x_1 - C_2x_2; \\ \dot{C}_1 = \frac{2x_1x_2}{\omega^2} \left(x_1^2 + \frac{x_2^2}{\omega^2} - A^2 \right); \\ \dot{C}_2 = \frac{2x_2^2}{\omega^2} \left(x_1^2 + \frac{x_2^2}{\omega^2} - A^2 \right). \end{cases} \quad (15)$$

Проинтегрировав приведенные выражения, можно исследовать процессы $x_1(t)$, $x_2(t)$, $C_1(t)$, $C_2(t)$ и наблюдать фазовые портреты с помощью пакета MATLAB.

Моделирование синтезированной адаптивной системы управления на MATLAB Simulink. Зависимости $x_1(t)$, $x_2(t)$, $C_1(t)$, $C_2(t)$ можно исследовать, интегрируя выражения (17) с помощью пакета Simulink (рисунок 3). Полученные результаты моделирования показаны на рисунках 4–7, соотношение между изменением выхода параметры и скоростью изменения $x_2(t)$ иллюстрируется фазовым портретом, представленном на рисунке 8.

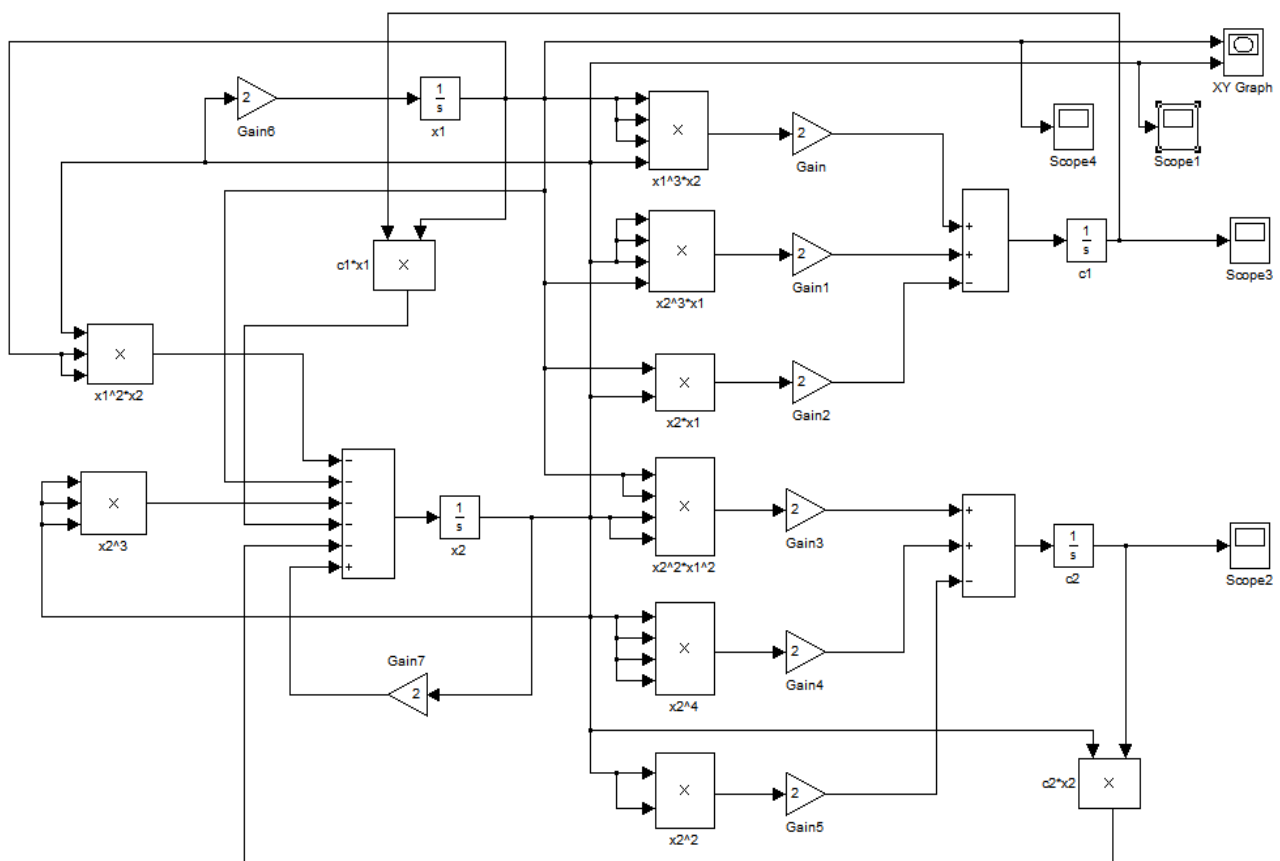


Рис. 3. Структурная схема моделирования синтезированной системы в пакете MATLAB Simulink.

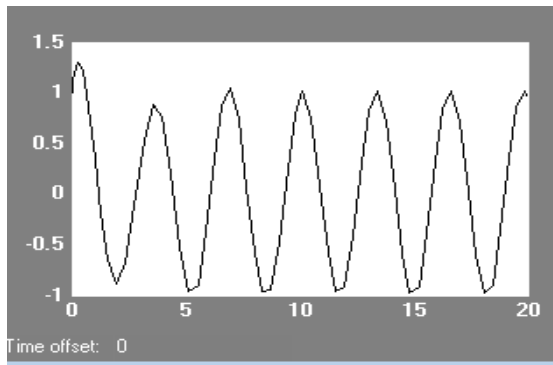


Рис. 4. Процесс на выходе $x_1(t)$.

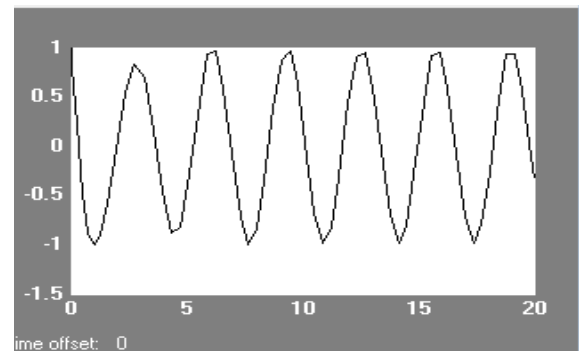


Рис. 5. Процесс на выходе $x_2(t)$.

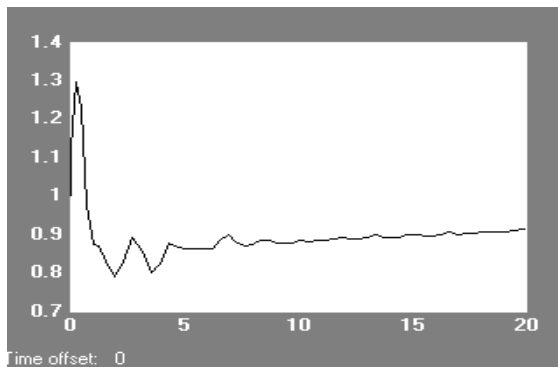


Рис. 6. Процесс на выходе $c_1(t)$.

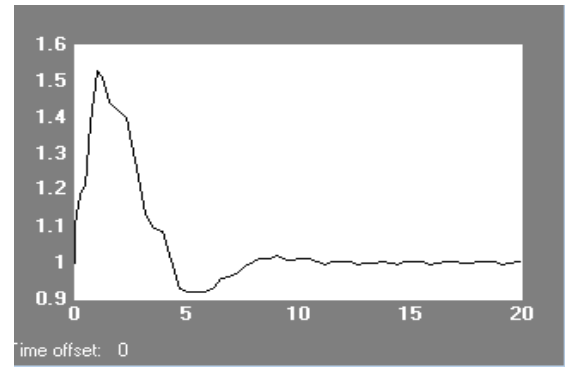


Рис. 7. Процесс на выходе $c_2(t)$.

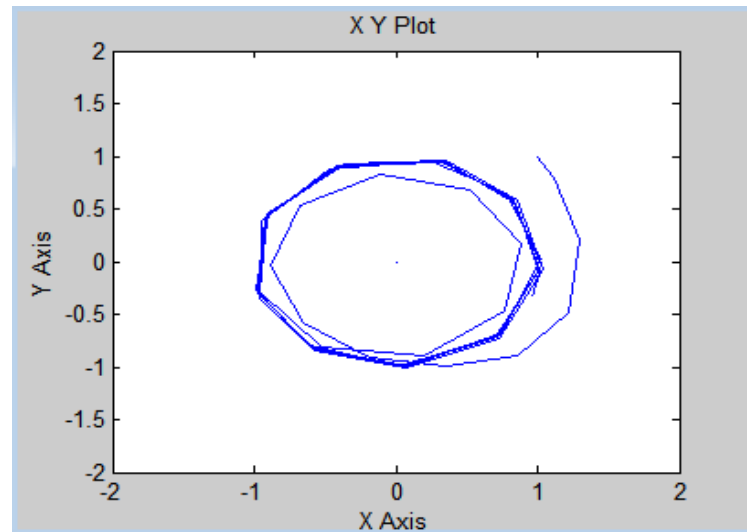


Рис. 8. Фазовый портрет выходных сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$.

Данный фазовый портрет полностью подтверждает теоретические выводы и показывает процедуру синтеза (определения) искомых законов управления, когда предписанная траектория задается в аналитической форме.

Подход к синтезу законов управления в случаях задания предписанной траектории движения в табличной форме. Во многих практических важных случаях, например, в задачах робототехники, при автоматизации раскроя и конструирования одежды, использования лазерных технологий микроэлектроники, в системах 3D-технологий и др. аналитическое представление предписанной программы движения вызывает большие затруднения. В этих случаях предлагается следующий подход к синтезу. Пусть объект описывается системой

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad (16)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор состояния;

$u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ – вектор управления.

Требуется синтезировать закон управления по осуществлению траектории движения управляемой системы, заданной в табличной форме (см. таблицу 1).

Таблица 1

Предписанная траектория движения, заданная в табличной форме

t_k	t_0	t_1	t_2	t_3	$\dots$
x_1	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	$\dots$
x_2	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	$\dots$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
x_n	x_{n0}	x_{n1}	x_{n2}	x_{n2}	$\dots$

Для удобства принимается $t_k = k$, $k = 0, 1, 2, \dots$, т. е. вводятся абстрактные дискретные моменты времени.

Математическая модель объекта записывается в дискретной форме

$$\frac{x(k+1) - x(k)}{t_{k+1} - t_k} = f(x(k), u(k), k) \quad \text{или} \quad \frac{x(k+1) - x(k)}{\Delta} = f(x(k), u(k), k).$$

Ее представляем в виде

$$x(k+1) = x(k) + f(x(k), u(k), k)\Delta, \quad (17)$$

где: $x(k)$ – текущее состояние, $x(k+1)$ – состояние на следующем шаге.

Из выражения (17) можно определить $u(k)$: $u(k) = U(x(k), x(k+1), k, \Delta)$.

Управление будет определяться из условия минимизации квадрата невязки:

$$\|x_{\text{табл}}(k+1) - x_{\text{текущ}}(k+1)\|^2 \Rightarrow \min_{u(k)} \quad (18)$$

Для линейного объекта $\dot{x} = Ax + Bu$ вышеописанного процедура синтеза приводит к результату

$$\begin{aligned} u(k) &= -\frac{1}{2\delta^2} (B^T B)^{-1} [2B^T \delta x_{\text{табл}}(k+1) - 2B^T (A\delta + E) \delta x(k)] = \\ &= -\frac{1}{\delta^2} (B^T B)^{-1} [B^T \delta x_{\text{табл}}(k+1) + B^T (A\delta + E) \delta x(k)]. \end{aligned} \quad (19)$$

Пример реализации предписанной траектории, заданной таблицей. Известно, что соответствующая математическая модель дискретного движения 3-х шаговых приводов по осям X, Y, Z описывается в виде следующей системы управлений

$$\begin{cases} X_{k+1} = x_k + n_{kx} \cdot L_{\text{шx}}; \\ Y_{k+1} = Y_k + n_{ky} \cdot L_{\text{шy}}; \\ Z_{k+1} = Z_k + n_{kz} \cdot L_{\text{шz}}; \end{cases} \quad (20)$$

отсюда

$$\begin{cases} n_{kx} = \frac{X_{k+1} - X_k}{L_{\text{шx}}}; \\ n_{ky} = \frac{Y_{k+1} - Y_k}{L_{\text{шy}}}; \\ n_{kz} = \frac{Z_{k+1} - Z_k}{L_{\text{шz}}}. \end{cases} \quad (21)$$

Компьютерное моделирование траекторного движения с применением пакета MATLAB, на основе таблицы 2 и уравнений (20), (21) проведено на рисунке 9.

Таблица 2

Пример табличного задания предписанной программы движения

время коорд.	t ₀ =0	t ₁ =1	t ₂ =2	t ₃ =3	t ₄ =4
X _k	0	7	8	2,2	0
Y _k	0	7	8	2,2	0
Z _k	0	7	8	8	0

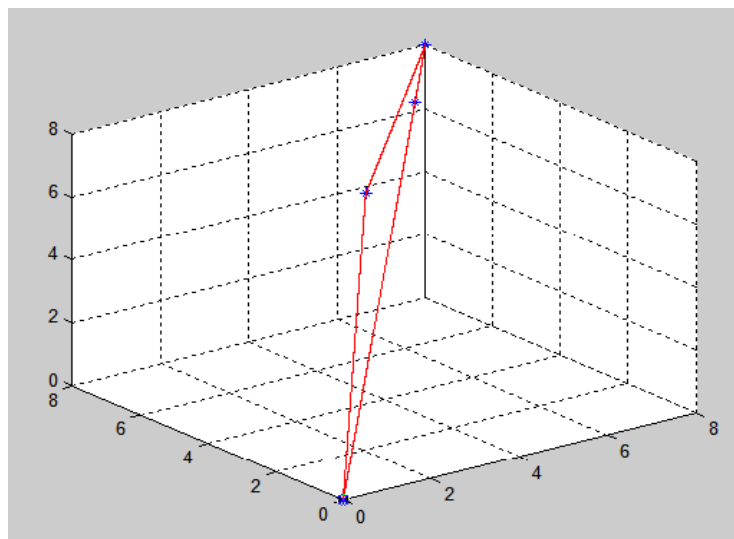


Рис. 9. Результат моделирования траекторного движения.

Результат моделирования (рис. 9) показывает, что действительно, движение происходит по предписанной траектории, заданной в таблице 2.

Таким образом представлены процедуры синтеза законов управления, когда предписанная траектория задается аналитически, и синтез законов в случае, когда предписанная траектория движения задается в табличной форме. Проведенное моделирование демонстрирует конструктивность и высокую эффективность предлагаемых процедур синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батырканов Ж. И., Шаршеналиев Ж. Ш. Синтез систем управления с заданными показателями качества. – Бишкек: Илим, 1991. – 174 с.
2. Батырканов Ж. И., Кадыркулова К. К. Синтез законов управления по осуществлению движения управляемого объекта по предписанной программе // Вестник науки Костанайского социально-техн. унив. им. академика Зулхарной Алдамжар. Костанай. – 2013. – № 3. – С. 29–33.
3. Батырканов Ж. И., Кадыркулова К. К. Синтез законов управления для осуществления движения объекта по предписанной программе // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 1 (29). – С. 143–155.
4. Батырканов Ж. И., Кадыркулова К. К., Мамбетдинов И. М. Разработка системы управления шаговыми приводами трехзвенного манипулятора [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2018. – №13. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/razrabotka->

sistemy-upravleniya-shagovymi-privodami-trekhzvennogo-manipulyatora (дата обращения: 20.10.2021).

5. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

КАПИТОНОВ С. С., ТУЕВ В. И., СОЛДАТКИН В. С., ГУЩИН Д. В.
ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Аннотация. В статье рассмотрены основные проблемы создания высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения на основе гетероструктур. Указаны основные физические эффекты, ограничивающие эффективность прибора, такие как эффект стягивания тока вблизи металлических контактов, а также явление полного внутреннего отражения излучения, сгенерированного в активной области. Определён перечень следующих научно-технических задач, требуемых решения для создания высокоэффективных источников УФ излучения на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами.

Ключевые слова: ультрафиолетовый светодиод, гетероструктура, эффективность, бактерицидное устройство.

KAPITONOV S. S., TUEV V. I., SOLDATKIN V. S., GUSHCHIN D. V.
PROBLEMS OF CREATING HIGH-EFFICIENCY SOURCES
OF ULTRAVIOLET RADIATION BASED ON HETEROSTRUCTURES

Abstract. The main problems of creating highly efficient sources of ultraviolet radiation based on heterostructures are considered in the article. the main physical effects are indicated, limiting the efficiency of the device, such as the effect of current constriction in the vicinity of metal contacts, as well as the phenomenon of total internal reflection of radiation generated in the active region. The list of the following scientific and technical problems is determined, the required solutions for the creation of highly efficient UV radiation sources based on heterostructures with multiple quantum wells.

Keywords: ultraviolet light-emitting diode, heterostructure, efficiency, germicidal device.

В настоящее время одним из актуальных направлений светотехники является развитие имеющегося научного задела до стадии готовности к практическому применению технологии интеллектуального роботизированного производства надёжных полупроводниковых источников ультрафиолетового излучения, бактерицидных устройств на их основе и организация серийного производства подобных приборов.

В настоящее время применяется следующая классификация ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра. Весь УФ диапазон состоит из трёх поддиапазонов: УФ-А (390–315 нм), УФ-В (315–280 нм), УФ-С (меньше 280 нм). Поддиапазон УФ-А соответствует солнечному излучению, проходящему через атмосферу и достигающему поверхности Земли даже через облака. Это излучение опасно для здоровья человека. Излучение УФ-В поддиапазона

частично поглощается в озоновом слое Земли и также опасно для здоровья, тогда как УФ-С от Солнца до Земли не доходит [1].

В связи со сложной эпидемиологической обстановкой, установившейся в нашей стране и мире, наибольший интерес представляет развитие источников излучения в диапазоне УФ-С, поскольку электромагнитные волны в данном диапазоне обладают бактерицидными свойствами. Для создания диодов на указанный диапазон УФ излучения на внутреннем фотоэффекте с собственным поглощением необходимы кристаллические материалы с шириной запрещённой зоны от 3,18 до 4,4 эВ. Данные значения ширины запрещённой зоны указывают на то, что использовать необходимо диэлектрические материалы. К наиболее подходящим материалам относятся соединения $A^{III}N$, из которых совершенными в структурном отношении являются AlN , GaN , InN . Их ширина запрещённых зон составляет 6,1 эВ, 3,4 эВ и 0,77 эВ соответственно. Следовательно, в качестве основного материала для изготовления УФ светодиодов на основе гетероструктуры с квантовыми ямами подходит только AlN . Барьерные слои следует изготавливать из AlN или в комбинации с GaN , достаточной для получения требуемой глубины квантовой ямы. Сами квантовые ямы надо делать из этого материала с добавлением большего количества GaN : $Al_xGa_{1-x}N$. Для получения требуемой длины волны излучения УФ диапазона из выражения для зависимости ширины запрещенной зоны материала квантовой ямы от содержания алюминия:

$$\Delta E_g^{A_xB} = \Delta E_g^A + (\Delta E_g^B - \Delta E_g^A) \cdot x + x \cdot (1-x) \cdot E_b.$$

Можно найти процент содержания алюминия в материале квантовой ямы с учетом энергии параболического изгиба – $E_b = 1.0$ эВ. Расчеты показывают, что в материалах УФ светодиода процентное содержание алюминия оказывается достаточно высоким: $x=0,25-0,32$.

Столь высокое содержание добавки в виде Al приводит к снижению структурного совершенства плёнки $Al_xGa_{1-x}N$: в ней возрастает концентрация точечных дефектов, кластеров, полных и частичных дислокаций, приводящих к увеличению скорости безизлучательной рекомбинации в котреловской атмосфере дислокаций. Это одна из причин низкого качества изготавливаемых УФ-диодов [1, 2].

Основным элементом УФ-излучателей является УФ-кристалл. При разработке УФ-кристаллов с высоким КПД основными физическими эффектами, ограничивающими эффективность прибора, являются эффект стягивания тока вблизи металлических контактов,

а также явление полного внутреннего отражения излучения, сгенерированного в активной области.

Эффект стягивания тока вблизи металлических контактов заключается в локализации максимальной плотности тока в области, перелагающей к периметру омического контакта. При таком протекании тока фактически используется менее 30 % активной области гетероструктуры (рис. 1а, TG/LED). При этом, такое стягивание тока вызывает значительный локальный перегрев всей структуры в целом, а также генерацию квантов в области преимущественно под металлическими контактами, которые препятствуют их выходу из структуры. Устранить данное явление возможно с применением на поверхности слоя растекания тока (рисунок 1а, DG/LED). Введение слоя растекания тока позволяет значительно улучшить энергетические и электрические характеристики кристаллов светодиодов, что обеспечит его высокий КПД (рисунок 1б).

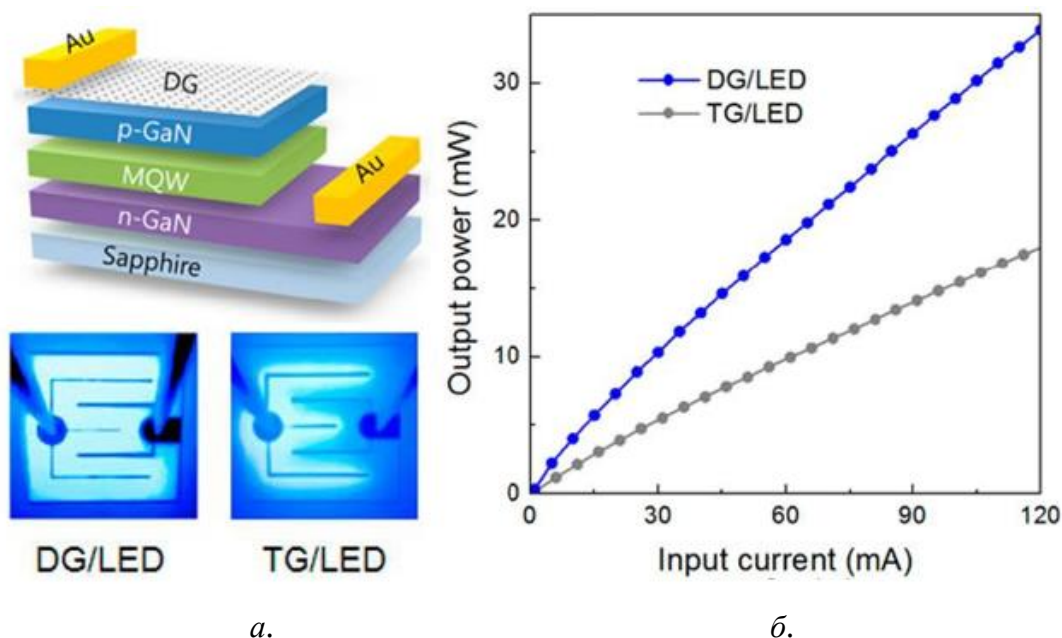


Рис. 1. Применение слоя растекания тока в конструкции УФ-кристаллов.

Эффект полного внутреннего отражения сгенерированного излучения возникает за счет того, что сгенерированный квант излучения, попадая на зеркальную границу раздела полупроводник/среда со значительной вероятностью претерпевает отражение, возвращаясь обратно в полупроводниковый кристалл. Для того чтобы уменьшить вероятность такого отражения, не приводящего к выходу излучения из кристалла, необходимо сделать отражение не зеркальным, а диффузным – рассеянным. В следствие этого актуально исследование возможности создания кристалла со значительно развитой поверхностью (рисунок 2а), что будет приводить к падению излучения на нее под произвольным (не

предсказуемым) углом, а значит вероятность того, что энергия покинет кристалл, уже достаточно велика, тем самым увеличивается эффективность УФ-диода (рисунок 2б).

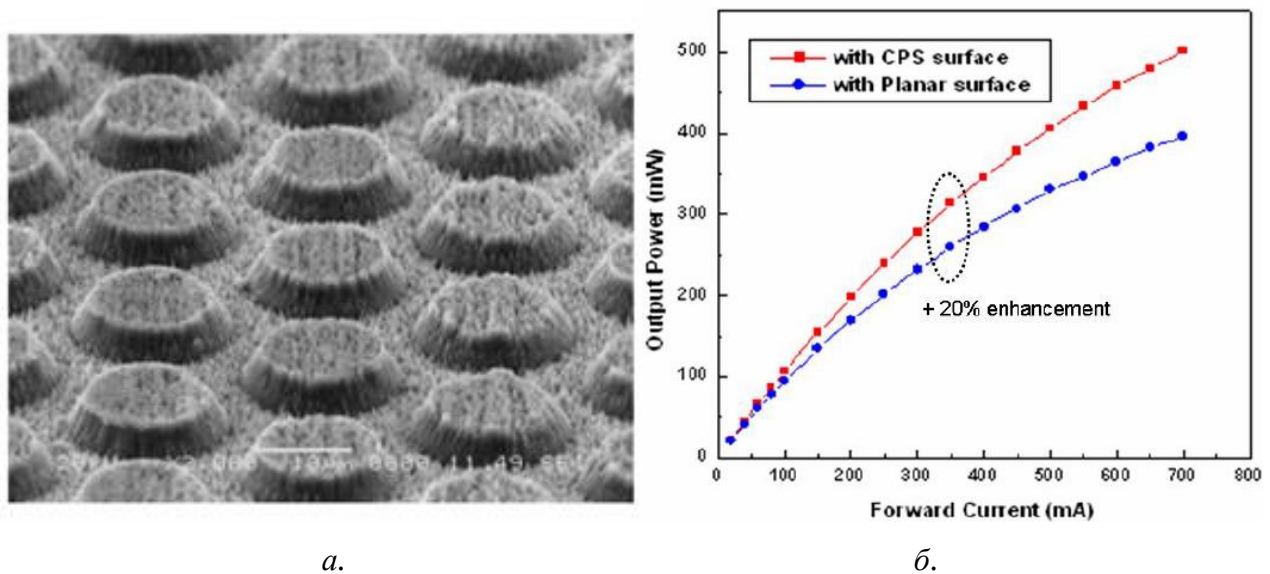


Рис. 2. Морфология CPS поверхности (а) и зависимость выходной мощности кристаллов с CPS поверхностью от тока (б).

После окончания исследования проводится отработка и корректировка технологических операций, необходимых для изготовления УФ-диодов с улучшенными энергетическими параметрами, основные из которых следующие.

1. Жидкостное и плазмохимическое травление наногетероструктуры на основе для получения мезы, а также для формирования наноструктурной поверхности.
2. Исследование контактного сопротивления многослойной металлизации к п- и р-слоям наногетероструктуры для получения наилучшего контактного сопротивления омических контактов.
3. Оработка технологического процесса нанесения слоя растекания тока, в качестве которых будет использоваться плёнки новых оптически прозрачных в УФ диапазоне материалов.

Низкое значение эффективности излучения УФ-диодов диктует необходимость разработки способов её повышения. Одной из основных причин её низкого значения является высокое поле спонтанной и пьезоэлектрической поляризации внутри квантовой ямы и вызванное им пространственное разделение неравновесных носителей заряда в квантовых ямах, то усилия разработчиков УФ-диодов должны быть направлены на уменьшение величины поляризации [7].

Если поле спонтанной поляризации изменить не представляется возможным, то управлению подлежит величина пьезоэлектрического поля, в основе которого лежит упругая деформация на межфазной границе «квантовая яма – барьерный слой». При решении этой

задачи необходимо также учитывать электрическое поле, создаваемое пирозлектрическим эффектом, определяемого температурой нагрева излучающего элемента и величиной пирозлектрического коэффициента материала элемента, который в AlN один из самых больших среди соединений « $III - N$ » [1–3; 5–7].

Повышение эффективности излучения УФ гетероструктуры может быть также достигнуто за счёт оптимизации захвата носителей заряда квантовой ямой и увеличения числа захватываемых носителей. Согласно результатам предварительного расчёта, указанные способы повышения эффективности могут быть реализованы путём изменения энергетического спектра ямы и оптимизации её профиля [8–10].

Проблема высокого тепловыделения УФ излучающей гетероструктурой – основная проблема создания высокоэффективного источника ультрафиолета, в основе которой лежит проблема низкой эффективности источника данного типа, а также низкая эффективность используемых методов отвода излишков тепла от активного элемента в окружающее пространство.

Основными традиционными способами охлаждения светоизлучающего прибора, изготавливаемого с применением светодиодных гетероструктур, являются размещение светоизлучающих элементов на металлическом радиаторе различной формы, а также наполнение внутреннего объема прибора молекулярным гелием под давлением порядка 0,1 атм. В ряде случаев для улучшения условий охлаждения разрабатываются новые формы стеклянной колбы с увеличенной площадью охлаждения, в которой размещаются светоизлучающие элементы. Перечисленные способы охлаждения не обеспечивают достаточной эффективности охлаждения, что, в конечном счёте, ограничивает мощности излучения создаваемого светоизлучающего прибора [11].

Для повышения эффективности охлаждения светоизлучающих элементов представляется целесообразным направить избытки энергии, которые имеют место при работе излучающих гетероструктур: тепловая энергия, выделяемая этими элементами, а также энергия коротковолнового излучения, сопровождающего излучение с требуемой длиной волны. Превращение указанных видов энергии в форму, удобную для создания процессов, охлаждающих как сами нагревательные элементы – светодиодные гетероструктуры, так и стенки стеклянной колбы светоизлучающего прибора, может быть выполнено с использованием электрокалорического эффекта в пирозлектриках, который имеет наибольшую величину в сегнетоэлектрических кристаллах. В качестве другого способа перевода формы избыточной энергии могут быть использованы внутренний и внешний фотоэффекты с переносом поглощенных избытков энергии неравновесными

носителями заряда в специально нанесённых полупроводниковых слоях, нанесённых на внутреннюю поверхность колбы и на крепление излучающих гетероструктур [11].

Предварительные оценки эффективности указанных направлений по разработке дополнительных способов охлаждения светоизлучающих приборов показывают возможность улучшение их охлаждения как совместно с традиционно используемыми способами, так и отдельно от них [7; 11].

Отдельно стоящая задача исключения из потока выходящего излучения наряду с излучения с заданной длиной волны, части излучения с более высокой энергией квантов может быть решена в рамках задачи улучшения охлаждения светоизлучающего прибора. Это может быть реализовано подбором спектра поглощения тонкоплёночных покрытий на внутренней поверхности колбы. Сгенерированные неравновесные электроны будут удаляться за счёт действия электрического напряжения, приложенного этим покрытиям [7].

Ещё одной причиной низкой эффективности УФ-диодов является увеличение спонтанной поляризации в веществе квантовой ямы. Дело в том, что вещество барьерного слоя и квантовой ямы на основе AlN растёт вдоль полярного направления, представляющего собой ось симметрии шестого порядка точечной группы симметрии кристалла $6mm$, которая является полярным направлением. По этой причине растущая поверхность пленки представляет собой А- или В-поверхности, на которых выходят ионы алюминия или азота. Это приводит к формированию встроенных (спонтанных) полей вследствие большой величины константы спонтанной поляризации в AlN [2, 3]. Величина спонтанной поляризации в этом материале [3; 4]. В итоге величина электрического поля спонтанной поляризации в квантовой яме может достигать нескольких единиц МВ/см [5–7].

К указанным механизмам поляризации в квантовой яме следует добавить поле, создаваемое пьезоэлектрическим эффектом, причём z-компонента вектора пьезополяризации в кристаллах AlN одна из самых больших среди материалов $A^{III}N$ [4]. Величина пьезоэлектрического поля пропорциональна изменению температуры кристалла, которое в рабочих условиях составляет около 100°C . Учитывая неоднородность тока в гетероструктурах из-за высокой дефектности выращиваемых слоёв $AlN / Al_xGa_{1-x}N$ величина пьезоэффекта может превысить влияние пьезоэлектрического эффекта, который в гетероструктурах $GaN / In_xGa_{1-x}N$ является основным механизмом поляризации квантовых ям [6].

В результате внутри слоёв светодиодной гетероструктуры действует большое электрическое поле, значительно превышающее 10^6 В/см. Столь большое электрическое поле в квантовой яме приводит к пространственному разделению пакетов неравновесных носителей зарядов ввиду различия зарядов электронов и дырок. Смещение центроидов

зарядов в ямах приводит к уменьшению скорости излучательной рекомбинации носителей заряда в разнозаряженных квантовых ямах светодиодных гетероструктур. Тем самым происходит снижение внутренней квантовой эффективности источника УФ излучения до значения около 0,3 % на длине волны 280 нм [2; 3; 5].

Следующая причина низкой эффективности УФ светодиодов вытекает из предыдущих, но физически имеет самостоятельную природу – это высокая температура рабочего кристалла при сравнительно малых рабочих токах. Если у светодиодных гетероструктур на основе барьеров $GaN/InGaN$ плотность рабочего тока составляет порядка 100 мА/мм², то у гетероструктур на основе $AlN/Al_xGa_{1-x}N$ он на порядок меньше.

Таким образом, для создания высокоэффективных источников УФ излучения с $\lambda < 0.30$ мкм на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами необходимо решение следующих научно-технических задач:

1) разработка технологических приёмов выращивания слоёв из AlN , обеспечивающих снижение их дефектности и повышения вероятности излучательных переходов в квантовых ямах из $Al_xGa_{1-x}N$ [2; 3; 5];

2) разработка физических принципов и технологических приемов по увеличению внутренней квантовой эффективности эмиссии излучения в квантовых ямах [8–10] на основе $Al_xGa_{1-x}N$ с высоким содержанием алюминия;

3) разработка физических способов и конструкторского решения по улучшению охлаждения излучающих элементов светоизлучающих приборов [11], изготовленных на основе УФ светодиодных гетероструктур из барьеров $AlN/Al_xGa_{1-x}N$ в том числе с использованием фундаментальных свойств кристаллических материалов [7; 11];

4) разработка физических принципов и технических решений их реализующих, не только исключаящих из потока генерируемого излучения высокоэнергетичных фотонов с энергией выше 4,2 эВ, вредного для здоровья человека, но и исключаящих дополнительный нагрев светоизлучающего прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. Юновича А. Э. – М.: Физматлит. 2008. – 495 с.
2. Шевченко Е. А. Квантово-размерный эффект Штарка и локализация носителей в квантовых ямах $AlGaIn/AlGaIn$ с различной морфологией // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – №8. – С.1022–1026.
3. Wood C., Jena D. Polarization Effects in Semiconductors: From Initio Theory to Device

Applications. – N.Y.: Springer, 2008. – 515 p.

4. Шалдин Ю. В., Matyjasik S. Пирозлектрические свойства широкозонного полупроводника AlN в области 4.2-300 К // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – № 9. – С. 1159–1165.
5. Супрядкина И. А., Абгарян К. К., Баженов Д. И., Мутигуллин И.В. Исследование поляризаций нитридных соединений $(Al, Ga, AlGa)N$ и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – № 12. – С.1647–1651.
6. Davydov V. N. Polarization properties of the InGaN/GaN heterostructures under heating // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 57. – No. 12. – P. 1648–1457.
7. Давыдов В. Н. Основы кристаллографии и кристаллофизики. Часть 2. Физические свойства кристаллов. – Lambert Academic Press; Издательско-книготорговый центр «Академкнига», 2014. – 92 с.
8. Давыдов В. Н., Задорожный О. Ф., Лапин А. И. Фононный спектр гетероструктуры с множественными квантовыми ямами // Изв. вузов. Физика. – 2020. – Т. 64. – № 4.
9. Davydov V. N., Karankevich O. A. Capture and emission of charge carriers by quantum well // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol.61. – No. 2. – P. 223–231.
10. Давыдов В. Н., Задорожный О. Ф., Туев В. И., Солдаткин В. С., Давыдов М. В., Вилисов А. А. Патент РФ. Светодиодная гетероструктура с квантовыми ямами комбинированного профиля. RU 2 729 046 С1. Рег. номер 2019123050 от 17.07.2019.
11. Давыдов В. Н., Туев В. И., Афонин К. Н., Солдаткин В. С., Давыдов М. В., Вилисов А. А. Патент РФ. Светодиодный источник излучения. RU 2 723 967 61 С1. Заявка № 2019133066 от 16.06.2019.

СУРАЙКИН А. И., ЛАБУТИН М. С., КУДРЯШОВ А. Д., СУРАЙКИН А. А.
МАКРОМОДЕЛЬ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА
ПИТАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. В статье приводятся результаты разработки универсального импульсного устройства питания в САПР TINA-TI на основе разработанной SPICE-макромодели. Проведено компьютерное имитационное моделирование с представлением временных диаграмм. Предлагается универсальное и эффективное схемотехническое решение с минимальным количеством навесных компонентов.

Ключевые слова: импульсный источник питания, широтно-импульсная модуляция, ШИМ-контроллер, макромодель, имитационное моделирование.

SURAYKIN A. I., LABUTIN M. S., KUDRYASHOV A. D., SURAYKIN A. A.
SPICE MACRO MODEL AND SIMULATION OF SWITCHING POWER SUPPLY
FOR UNIVERSAL APPLICATION

Abstract. The article provides the results of engineering design of universal switching power supply at CAD TINA-TI based on the designed Spice macro model. A computer imitation design with represented time-diagram is done. A universal and effective schematic design with minimal amount external parts is proposed.

Keywords: switching power supply, pulse width modulation, PWM-controller, Spice macro model, imitation simulation.

Принципиально важным фактором при разработке импульсного источника питания (ИП) светодиодов универсального применения, является минимизированная избыточность конструкции. Это позволяет уменьшить габариты ИП и его стоимость. Применение оригинальных схемотехнических решений, позволяет, с одной стороны, получить все требуемые параметры при минимизированных затратах, с другой стороны, использовать многие передовые достижения в области импульсной преобразовательной техники [1].

При разработке универсального, малогабаритного ИП, необходимо найти экономичное и эффективное решение. Так, для получения светового потока в 1 200 лм, аналогичного потоку лампы накаливания мощностью 100 Вт, необходимо управлять 12–14 светодиодами, мощностью не менее 1 Вт с номинальной светоотдачей не ниже 100 лм/Вт при рабочем токе 350 мА [2].

Практически всегда, при разработке ИП возникает проблема отвода тепла, выделяющегося в малом объёме. Источником тепла в светодиодном светильнике, кроме

самих светодиодов, всегда является сам ИП. К универсальным ИП с малыми габаритами предъявляются достаточно жёсткие требования:

- изоляция светодиодов от корпуса устройства освещения,
- при необходимости гальваническая изоляция светодиодов от схемы управления,
- высокий КПД,
- малые габариты, обеспечивающие возможность встраивания в малогабаритный корпус,
- наличие корректора коэффициента мощности (активного или пассивного), так как могут быть варианты с применением аккумуляторных батарей,
- низкая себестоимость в массовом производстве.

В связи с тем, что реализация современного высокоэффективного, конкурентоспособного импульсного ИП невозможна без применения ИС импульсных источников питания, то важен выбор наиболее подходящей микросхемы ШИМ-контроллера. Практически все ведущие фирмы-производители электронной компонентной базы (ЭКБ) выпускают управляющие ИС для импульсных источников питания. Номенклатура таких ИС огромна и выбор, как правило, связан с определением отношения – цена/требуемые характеристики. В этой связи интерес представляет такая микросхема, как TPS92210. Эту ИС выпускает такая известная фирма как Texas Instruments (США). При анализе параметров вышеуказанной микросхемы необходимо ориентироваться на техническую информацию компании Texas Instruments на ИС TPS92210 [3]. Практический интерес к микросхеме TPS92210 связан ещё и с тем, что она обладает широким набором функций, включая наличие корректора коэффициента мощности и уникальными характеристиками, позволяющими гибко реализовывать различные ИП для многих компактных вариантов светодиодных светильников бытового и промышленного назначения.

Упрощённая принципиальная электрическая схема ИП на основе микросхемы ШИМ-контроллера TPS92210 приведена на рисунке 1. Следует отметить – данная микросхема не требует внешнего датчика тока для автоматической стабилизации тока светодиодов. Эта функция реализована непосредственно в самой микросхеме.

Для оптимизации того или иного схемотехнического решения импульсного ИП целесообразно провести расчёт с применением компьютерного имитационного моделирования на основе макромоделей микросхемы TPS92210. Однако на сайте производителя (Texas Instruments) отсутствует какая-либо информация по SPICE-макромоделям микросхемы TPS92210.

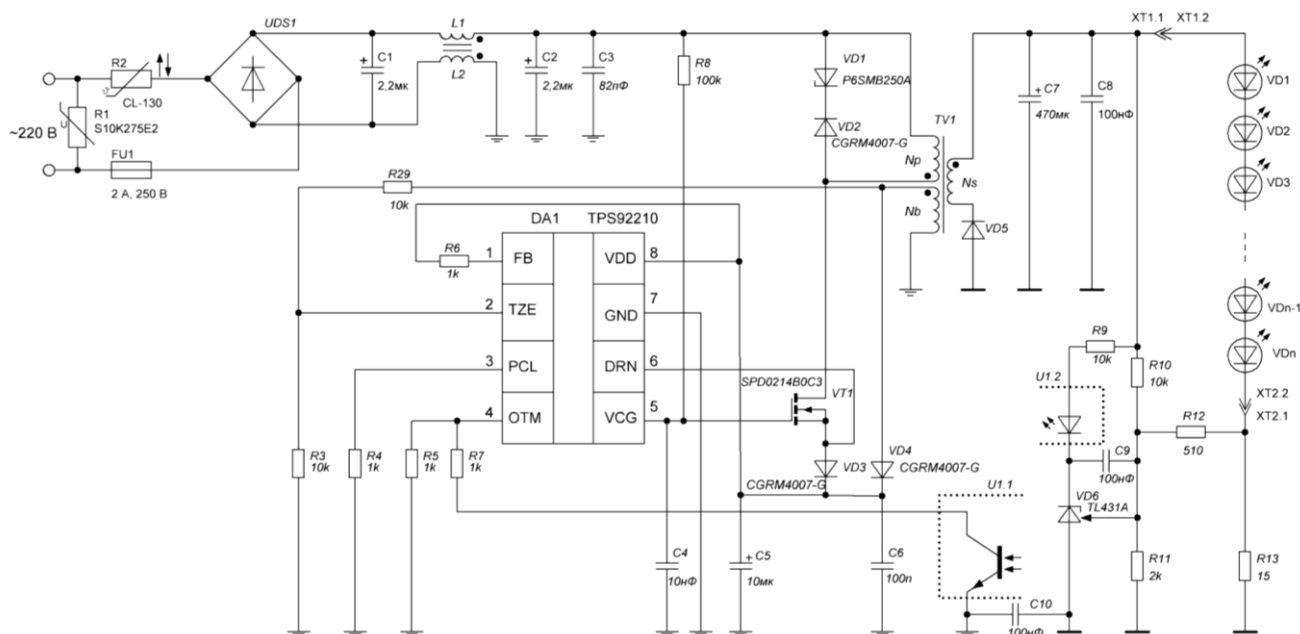


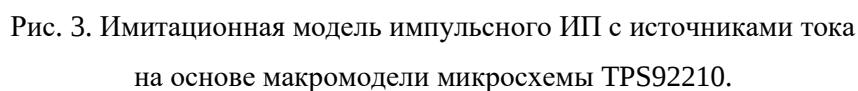
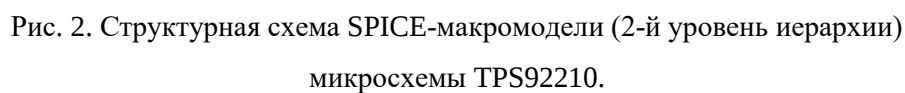
Рис. 1. Упрощённая принципиальная электрическая схема
импульсного ИП на основе микросхемы TPS92210.

Таким образом, для реализации компьютерного моделирования была выполнена разработка SPICE-макромодели микросхемы TPS92210 для применения в составе САПР TINA-TI [4]. Применение указанной САПР связано тем, что это свободно распространяемая некоммерческая САПР с хорошо отлаженными вычислительными алгоритмами для импульсных устройств. Разработка SPICE-макромодели микросхемы TPS92210 выполнена на основе блочно-иерархического принципа. Структурная схема разработанной SPICE-макромодели (2-й уровень иерархии) микросхемы TPS92210 приведена на рисунке 2.

Макромодель микросхемы TPS92210, как собственно и большинства других микросхем подобного класса, представляет собой функциональную схему, содержащую три уровня иерархии:

- первый уровень – уровень элементов, на которых выполнены принципиальные электрические схемы функциональных узлов;
- второй уровень – функциональный уровень, представляющий собой фактически функциональную схему микросхемы TPS92210;
- третий уровень – уровень микросхемы как устройства («чёрного ящика») на котором можно выполнять схемы различных источников питания.

Достаточность и удобство трехуровневого представления SPICE-макромодели микросхемы TPS92210 обусловлено тем, что при проведении имитационного моделирования, можно достаточно быстро вносить те или иные схемотехнические поправки на различных уровнях схемной иерархии.



На рисунке 3 приведена имитационная модель импульсного ИП на основе SPICE-макромодели микросхемы TPS92210 для анализа в САПР TINA-TI. Эта модель позволяет проводить анализ и расчёт основных режимов работы импульсного ИП с применением навесных компонентов из состава встроенных библиотек САПР TINA-TI.

Имитационное моделирование разрабатываемого эффективного импульсного ИП универсального применения позволяет формировать временные диаграммы в различных временных интервалах обеспечивая, тем самым, как анализ начального режима работы (инициализация), так и установившийся (стационарный) режим работы ИП в пределах, заданных техническими требованиями, то есть проводить оценку режима стабилизации рабочего тока светодиодов [5].

На рисунке 4 приведены временные диаграммы перехода источника питания на стационарный режим. Сигналы получены в разных точках, в соответствии со схемой, приведённой на рисунке 3.

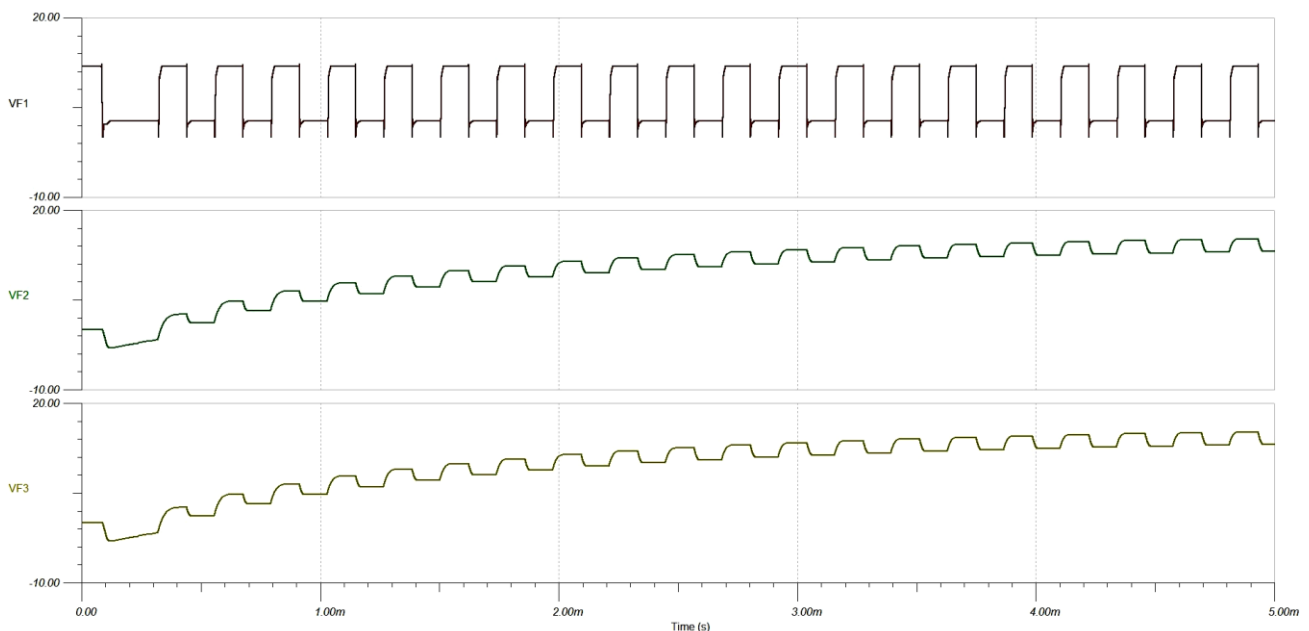


Рис. 4. Временные диаграммы работы импульсного ИП
на основе микросхемы ШИМ-контроллера TPS92210:

- на истоке МОП-транзистора (VF1);
- на обмотке обратной связи (дополнительной обмотке) трансформатора (VF2);
- на вторичной обмотке трансформатора (VF3).

Проведённый анализ полученных результатов моделирования позволил в первом приближении провести расчёт алгоритма работы малогабаритного импульсного ИП и определить основные требования к навесным компонентам микросхемы ШИМ-контроллера, включая МОП-транзистор и трансформатор. Эти требования входят и являются неотъемлемой частью общих требований к высококачественным импульсным источникам питания универсального применения:

- 1 Диапазон напряжения питания: 90–250 В (переменное),
- 2 Число последовательно включенных светодиодов: 7,
- 3 Прямое падение напряжения на одном светодиоде: 3,6 В,
- 4 Полное падение напряжения на светодиодах: $U_{LED}=7 \times 3,6 = 25,2$ В.

Начальный режим работы ИС TPS92210:

- 1 Номинальная частота работы ШИМ: $f_{SW}=5 \div 250$ кГц,
- 2 Номинальный рабочий ток светодиодов: $I_{LED(AVE)}=350$ мА,
- 3 Изменение тока светодиодов при изменении напряжения питания (обычно от 15 % до 30% относительно $I_{LED(AVE)}$): $\Delta i=0,3 \times 350=105$ мА,
- 4 Минимальное значение КПД: 80 %.

Применение SPICE-макромодели микросхемы TPS92210, приведённой на рисунках 2 и 3 позволяет проводить моделирование и расчёт различных вариантов схем малогабаритных импульсных ИП для компактных светодиодных устройств освещения. Форму и размеры макетных образцов и рабочих печатных плат целесообразно выбирать исходя из размеров корпуса разрабатываемого ИП и устройства освещения. Монтаж светодиодов целесообразно проводить на отдельных печатных платах с учётом их габаритов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z / Пер. с англ. – К.: МК-Пресс; СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 256 с.
2. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. – 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
3. Техническая инф. по ИС TPS92210 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ti.com/TPS92210 (дата обращения 03.10.2021).
4. Техническая информация по САПР TINA-TI. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ti.com/tool/TINA-TI (дата обращения 03.10.2021).
5. Сурайкин А. И., Курынов Б. В., Сеськин М. В., Сурайкин А. А. Высокоэффективные источники питания для светодиодного освещения // Электроника и электрооборудования транспорта. – 2020. – № 3. – С. 25–28.

БЕСПАЛОВ Н. Н., ГОРЯЧКИН Ю. В., ЯХЛОВ А. В.,

ЛИКАНИНА Д. А., САЙГУШЕВ В. С.

**ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА
И БАКТЕРИЦИДНОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ
ОТ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ**

Аннотация. В статье рассмотрены структурная и электрическая принципиальная схемы источника питания электростатического фильтра и бактерицидной ультрафиолетовой люминесцентной лампы от аккумуляторной батареи с напряжением +12 В. Проведено моделирование работы источника в программном комплексе NI Multisim 11. Продемонстрирована разработка макетного образца источника питания.

Ключевые слова: электростатический фильтр, бактерицидная ультрафиолетовая люминесцентная лампа, аккумуляторная батарея, мультивибратор, повышающий трансформатор, умножитель напряжения.

BESPALOV N. N., GORYACHKIN YU. V., YAHLOV A. V.,

LIKANINA D. A., SAYGUSHEV V. S.

**POWER SUPPLY OF ELECTROSTATIC FILTER AND BACTERICIDE
UV FLUORESCENT LAMP FROM RECHARGABLE BATTERY**

Abstract. The article discusses the structural and electrical schematic diagrams of the power source of an electrostatic filter and a bactericidal ultraviolet luminescent lamp from a storage battery with a voltage of +12 V. Modeling of the source operation in the NI Multisim 11 software package has been carried out. A prototype power source has been developed.

Keywords: electrostatic filter, germicidal ultraviolet fluorescent lamp, rechargeable battery, multivibrator, step-up transformer, voltage multiplier.

В современном мире уровень загрязнения воздуха пылью, бактериями и вирусами с каждым годом возрастает. В настоящее время различные болезнетворные бактерии и вирусы, которые оказывают сильное негативное воздействие на здоровье и образ жизни современного человека в основном передаются воздушно-капельным путём. Воздействие на здоровье человека различного вида пыли также велико. В связи с этим актуальным является создание малогабаритных и высокоэффективных очистителей воздуха рециркуляторного типа с применением электростатической фильтрации и бактерицидным ультрафиолетовым облучением, питание которых осуществляется от низковольтных аккумуляторных батарей (АБ).

Для уменьшения влияния загрязнения воздуха на человека используются специальные устройства – очистители воздуха. Очиститель воздуха может, как очищать воздух, используя

фильтры разной степени очистки, так и обеззараживать воздух, используя встроенные специальные бактерицидные лампы или устройства.

В настоящее время для очистки воздуха применяются следующие основные современные методы и технологии:

- НЕРА-фильтрация;
- электростатическая фильтрация;
- бактерицидная ультрафиолетовая обработка воздуха;
- электроофлювиальная ионизация воздуха;
- озонирование воздуха.

Наиболее высокоэффективным методом для очистки воздуха от пыли является электростатическая фильтрация дутьевого воздуха. Для работы электростатического фильтра применяются специальные высоковольтные генераторы постоянного напряжения, питаемые от сети переменного напряжения 220 В [1; 2].

В зависимости от конфигурации очистителей воздуха и используемых в нем электронных устройств используются различные типы источников питания (рисунок 1).

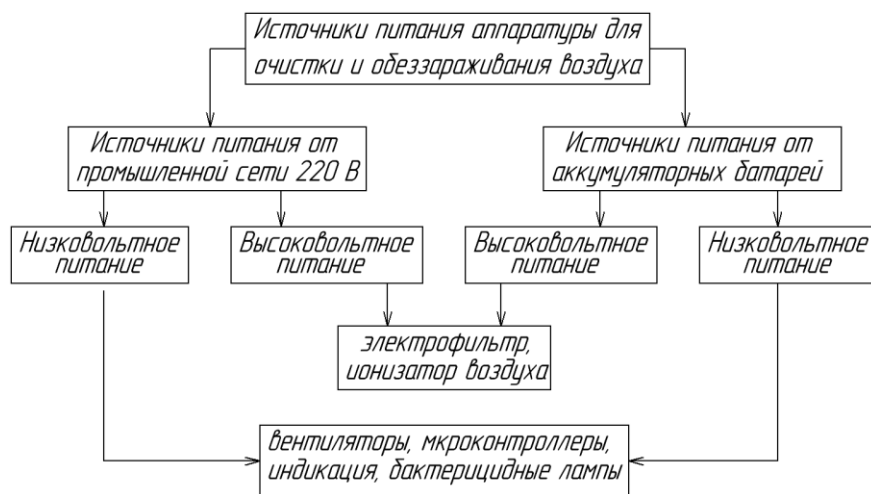


Рис. 1. Источники питания аппаратуры для очистки и обеззараживания воздуха.

Нами решалась задача разработки источника питания электростатического фильтра от АБ. Для этого была рассмотрена структурная схема преобразователя напряжения, представленная на рисунке 2.



Рис. 2. Структурная схема источника питания электростатического фильтра.

В качестве генератора с самовозбуждением (автогенератора) была использована схема мультивибратора на полевых транзисторах с трансформаторной связью с нагрузкой [2; 3].

На рисунке 3 представлена разработанная электрическая принципиальная схема источника питания электростатического фильтра от АБ +12 В.

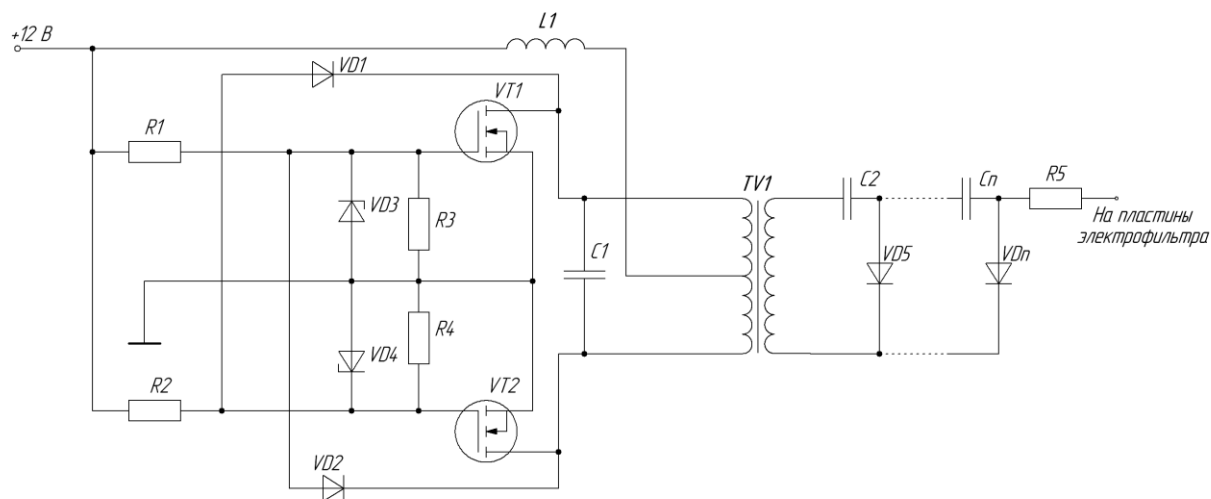


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема источника питания электростатического фильтра от АБ +12 В.

При подаче питания с АБ +12 В, через резистивные делителя напряжения $R1-R3$ и $R2-R4$ начинают протекать примерно одинаковые токи. При этом одновременно к затворам обоих полевых транзисторов прикладывается напряжение с резисторов $R3$ и $R4$, что обуславливает заряд входных ёмкостей. Из-за небольшого отличия характеристик транзисторов, один из них быстрее переходит в открытое состояние и начинает проводить ток. При этом через диод разряжается переход затвор-исток другого транзистора, который удерживается, таким образом, в закрытом состоянии. Преобразованное напряжение поступает на первичную обмотку повышающего трансформатора, где повышается до нескольких сотен вольт. К первичной обмотке трансформатора подключён конденсатор. В результате этого индуктивность первичной обмотки и конденсатор представляют собой резонансный контур, что обеспечивает формирование на обмотках трансформатора квазисинусоидальных сигналов напряжения. На вторичной обмотке формируется напряжение с действующим значением напряжения равным 220 В и частотой 20,8 кГц. К вторичной обмотке трансформатора подключается умножитель напряжения, который повышает напряжение до нескольких киловольт, а также вход системы облучения на основе бактерицидной ультрафиолетовой люминесцентной лампы.

Достоинствам данного схемного решения является простота схемотехнического решения, малые величины электрических помех и возможность создания электронной части очистительного устройства с малыми габаритами.

Предварительно электрические режимы схемы источника питания были определены при моделировании схемного решения в программной среде MULTISIM 11. Модель разрабатываемого источника питания показана на рисунке 4.

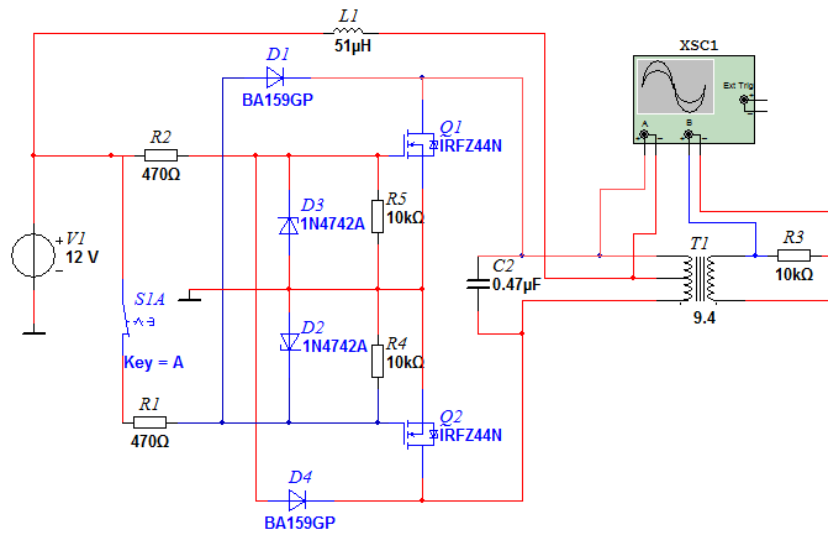


Рис. 4. Модель источника питания электростатического фильтра от АБ +12 В.

В модели используется ключ $S1A$, необходимый для запуска схемы, поскольку в электрических моделях полевых транзисторов ёмкости затворов одинаковые. Работа схемы настроена на резонанс напряжений в первичной обмотке повышающего трансформатора с помощью конденсатора $C2$. Регулируя напряжение питания, можно изменять напряжение, снимаемое со вторичной обмотки.

На рисунке 5 представлены результаты моделирования сигналов напряжения на входе и выходе импульсного повышающего трансформатора.

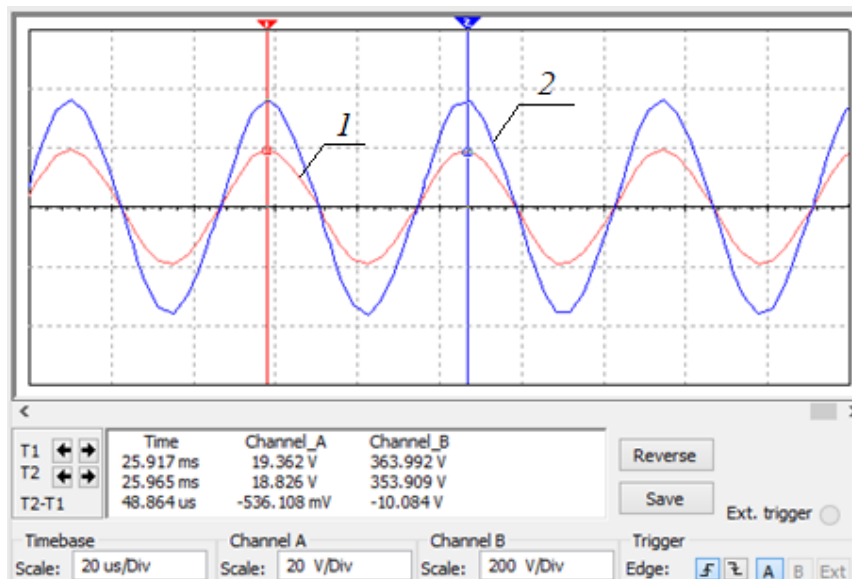


Рис. 5. Осциллограммы, снимаемые осциллографом XSC1:

- 1 – напряжение первичной обмотки повышающего трансформатора;
- 2 – напряжение вторичной обмотки повышающего трансформатора.

Из осциллограмм видно, что входной и выходной сигналы напряжения с трансформатора имеют синусоидальную форму. При этом амплитуда напряжения на первичной обмотке составляет 18,8 В при питании постоянным напряжением 12 В, а амплитуда напряжения на вторичной обмотке достигает величины 353 В.

При макетной реализации устройства выходной сигнал напряжения подавался на вход умножителя напряжения, на выходе которого формируется квазипостоянный сигнал напряжения величиной не менее 3,5 кВ. При испытании макетного образца его выходной сигнал также подавался на вход стандартного облучателя на основе бактерицидной ультрафиолетовой люминесцентной лампы.

На рисунке 6 представлен макетный образец источника питания электростатического фильтра от АБ +12 В при подключении к умножителю напряжения.

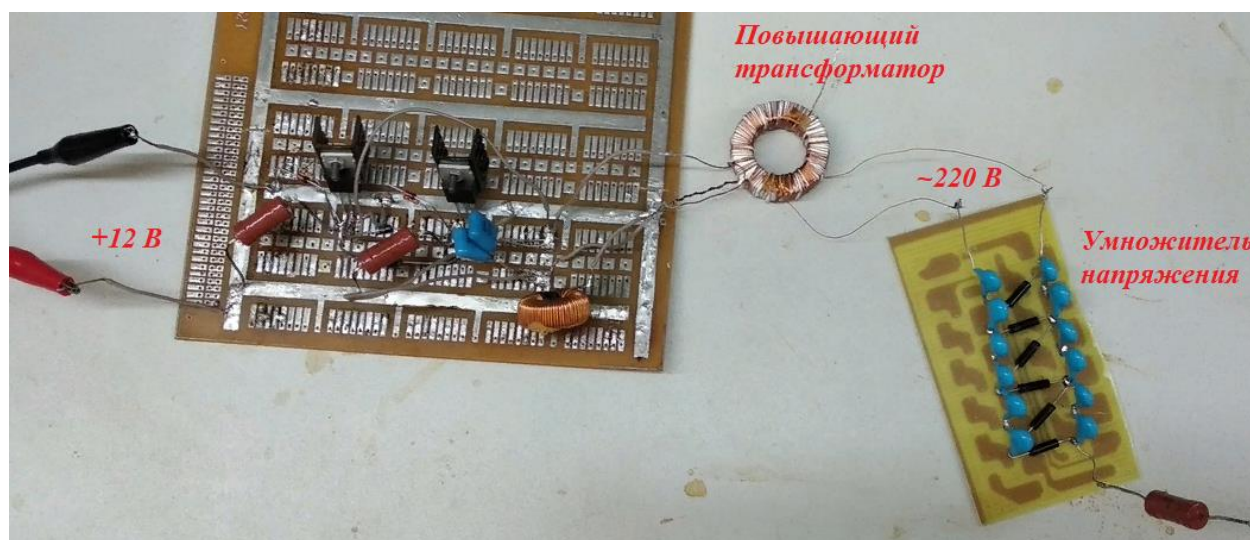


Рис. 6. Макетный образец источника питания электростатического фильтра от АБ +12 В.

На выходе повышающего трансформатора было установлено выходное напряжение амплитудой 310 В. При данном подключении ток потребления источника составил 0,12 А.

При подключении выхода данного источника к облучателю на основе бактерицидной ультрафиолетовой люминесцентной лампы, состоящей из электронного пускорегулирующего аппарата и системе питающей лампу была достигнута его устойчивая работа (рисунок 7). В макете использовался ЭПРА фирмы KOMTEX – LINE 508 0 01. В качестве бактерицидной ультрафиолетовой лампы 8 Вт использовалась люминесцентная лампа T5 8W 865/D. При данном подключении ток потребления от АБ источника составил 0,7 А.

Таким образом, при параллельном питании умножителя и системы бактерицидного ультрафиолетового облучения с применяемой лампой, общий ток потребления

составляет 0,82. Это обеспечивает потребление от АБ активной мощности равной 9,84 Вт.

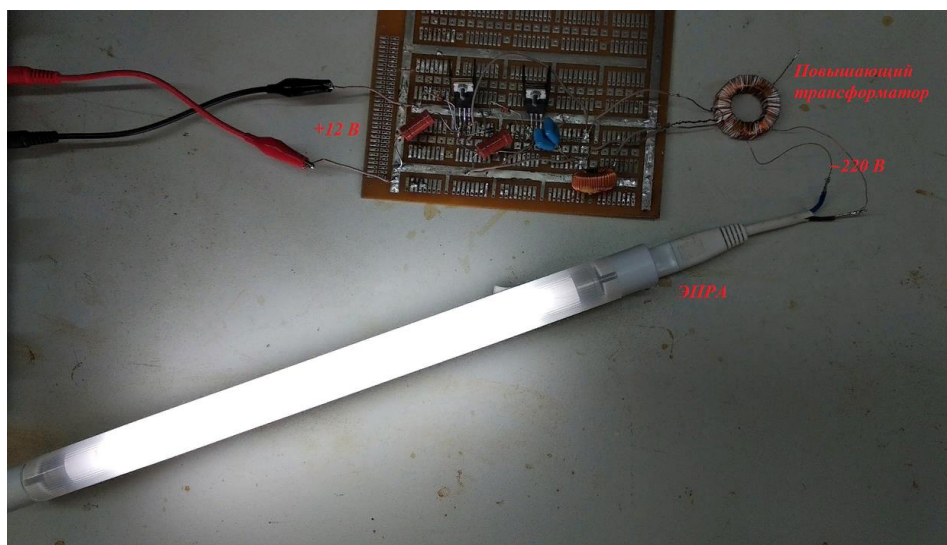


Рис. 7. Макетный образец источника питания бактерицидной ультрафиолетовой лампы 8 Вт от АБ +12 В.

Данное схемное решение позволит в дальнейшем создавать портативную аппаратуру для очистки и обеззараживания воздуха, питаемую от АБ +12. Данное устройство необходимо применять в помещениях, в которых отсутствует промышленная сеть 220 В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров М. Электростатический очиститель воздуха своими руками. Часть 1 – принципы работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/371071> (дата обращения 10.06.2021).
2. Беспалов Н. Н., Яхлов А. В. Разработка и моделирование системы питания электростатического фильтра. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46231165_41686990.pdf (дата обращения 28.06.2021).
3. Простой ZVS-драйвер на MOSFET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electrolibrary.info/electronics/24-prostoy-zvs-drayver-na-mosfet.html> (дата обращения 13.06.2021).
4. Мухутдинов Р. Источник высокого напряжения, автогенератор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://radiolaba.ru/vyisokoe-napryazhenie/istochnik-vyisokogo-napryazheniya-avtogenerator.html> (дата обращения 15.06.2021).

ЯМАШКИН С. А., ЯМАШКИНА Е. О.
РАЗРАБОТКА ГЛУБОКОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТИХИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ¹

Аннотация. В статье предложены принципы построения глубокой сверточной нейросетевой модели для решения задачи высокоточного прогнозирования развития стихийных процессов, в частности пожаров. Разработанная архитектура нейронной сети одновременно интегрирует спектральную и пространственную информацию и состоит из нескольких модулей: ввода, сверточного выделения признаков, вывода. Модель включает в себя компоненты обработки данных для точного и надежного обнаружения стихийных процессов на основе материалов дистанционного зондирования Земли в рамках репозитория глубоких нейросетевых моделей.

Ключевые слова: нейронная сеть, машинное обучение, репозиторий нейросетевых моделей, прогнозирование пространственных процессов.

YAMASHKIN S. A., YAMASHKINA E. O.
DEVELOPMENT OF DEEP NEURAL NETWORK MODEL
FOR PREDICTION OF NATURAL PROCESSES

Abstract. The article proposes the principles of constructing a deep convolutional neural network model for solving the problem of high-precision forecasting of the development of natural processes, in particular, fires. The developed architecture of the neural network simultaneously integrates spectral and spatial information and consists of several modules: input, convolutional feature extraction, output. The model includes data processing components for accurate and reliable detection of natural processes based on Earth remote sensing materials within the deep neural network models repository.

Keywords: neural network, machine learning, neural network model repository, prediction of spatial processes.

Введение. Природные и природно-техногенные стихийные процессы и чрезвычайные ситуации ежегодно наносят ущерб имуществу и угрожают жизни людей. Целью данного исследования является решение задачи актуализации репозитория нейросетевых моделей посредством разработки автоматизированных алгоритмов, анализирующих потоковые данные

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (грант № МК-199.2021.1.6).

изображений, полученные со спутников, для мониторинга и предотвращения перерастания пожаров в стихийные бедствия [4].

Разработка новых высокоточных алгоритмов прогнозирования развития стихийных пространственно-временных процессов на основе анализа больших массивов ретроспективных, текущих и экспертных данных, цифровых инфраструктур пространственных данных должна быть основана на экспериментальном исследовании системных связей и закономерностей функционирования и развития природно-социально-производственных систем с последующим комплексным применением сверточных и рекуррентных нейронных сетей [2]. Достижение необходимого результата может быть обеспечено двумя направлениями исследований: 1) использование информативных пространственно-временных данных для обучения глубоких моделей и классификации (в том числе данных ДЗЗ и электронных ландшафтных карт); 2) синтез новых эффективных нейросетевых архитектур для эффективного анализа больших данных в системе цифровых ИПД.

Методология исследования. Анализ спутниковых изображений является трудоемкой задачей, так как обработке подвергаются многочисленные временные зависимости, сложные изменения спектра и другие факторы и сопутствующие условия, такие как облака и свет.

Пусть $S = \{1, \dots, s_n, \dots, N\}$ представляет собой набор из целых чисел индексации пикселей мультиспектральных изображений, а $L = \{1, 2\}$ – набор из целых чисел индексации двух классов: «пожар есть» и «пожара нет». Изображения $X = \{x_1, \dots, x_n, \dots, X\}$ представляют собой набор, состоящий из N векторов признаков, где M – мерная функция. Изображения Sentinel-2 имеют 12 спектральных полос, поэтому данный параметр приемлем равным 12.

Раннее обнаружение лесных пожаров со спутниковых изображений является сложной задачей вследствие ряда факторов: точности распознавания препятствуют погодные условия, такие как облака и дождь; пространственные модели лесных пожаров имеют различные спектральные диапазоны. В проектируемой системе будут использованы трехмерные сверточные сети и семантическая сегментация для решения данных проблем. Семантическая сегментация характеризуется отображением «многие-ко-многим», когда изображению, состоящему из набора пикселей из выборки X соответствует один вектор из выборки Y : $Y = f(X)$. Элементы выборки Y обозначают вероятность того, набор пикселей и все изображение из выборки X принадлежат классу Y .

Современные данные дистанционного зондирования Земли (например, Sentinel-2) имеют высокие временное, пространственное и спектральное разрешения, которые

превосходят данные параметры у спутниковых снимков прошлого поколения [3; 5]. В связи с этим при разработке необходимо учитывать следующие требования.

1. Поиск пространственных зависимостей между соседними пикселями, так как лесные пожары распространяются на близлежащие расстояния.

2. Определение смешанных спектральных паттернов для обработки корреляции по спектральным полосам. Это положение определено тем, что спектральные диапазоны чувствительны к различным факторам, таким как повороты видеодатчика, условия атмосферного рассеяния и освещения.

Традиционные модели машинного обучения, такие как полносвязанные сети, в которых каждый нейрон связан с нейронами в следующих друг за другом слоях, не учитывают пространственные структуры и многоканальные зависимости. В разработке будут использованы архитектуры для глубокого машинного обучения, функции которых будут обобщены с различной степенью детализации благодаря последовательности слоев. В отличие от традиционных сверточных нейронных сетей для двумерных изображений, спектральные изображения имеют дополнительное измерение спектральных полос с частичными зависимостями между ними. По данной причине будет разработана трехслойная сверточная сеть.

Сверточные сети имеют большую вычислительную эффективность, чем полносвязанные, благодаря механизму распределения весов, в котором значения принимающих нейронов в одном слое имеют одинаковые веса и смещения при формировании их взвешенной суммы из наблюдаемых нейронов в рецептивном поле:

$$v_i = \varphi_c (b_i + w_i * x),$$

где $*$ – операция трехмерной свертки, смещение добавлено покомпонентно; v_i – итоговые значения применения i -го фильтра; φ_c – функция активации (например, ReLU); b_i – общее смещение фильтра; w_i – вектор с общим весом.

Последний сверточный слой соединяют с полносвязанным слоем, чтобы впоследствии рассчитать балл классификации лесного пожара. Проекционный слой состоит из нейронов, каждый из которых связан со всеми картами признаков в последнем сверточном слое. На выходе получаем вектор v_p^k с вычисленным k -м значением:

$$v_p^k = \varphi_p (w_p^k v + b_p^k).$$

Модуль вывода проектируемой сети состоит из проекционного слоя для преобразования вектора в ту же размерность, что и вектор измерения классификации. В формализованном виде слой проекции представляет собой линейное отображение:

$$y' = wv + b,$$

где y' – вектор обозначения баллов классификации лесного пожара.

Softmax – функция активации для нелинейности проекции. Рассчитаем потерю кросс-энтропии для обучения нейронной сети, которая сравнивает окончательную оценку y_c и метку каждого пикселя:

$$y_c = \frac{\exp y'_e}{\sum_{c' \in C} \exp(y'_{c'})}.$$

Результаты исследования. Предлагается архитектура глубокой нейронной сети, которая одновременно интегрирует спектральную, пространственную информацию и исторические данные. Сеть включает несколько блоков: 1) модуль прямого распространения для анализа данных об атомарном участке космической съемки; 2) сверточный модуль для анализа геопространственной окрестности территории; 3) сверточно-рекуррентный модуль для анализа временных последовательностей исторических наблюдений (в частности, погодных условий). Выходы этих блоков вытягиваются в вектор посредством модуля слияния данных и анализируются модулем финализации для принятия решения об устойчивости территории к пожарам. Опишем подробнее работу нейросетевой модели, представленную на рисунке 1.



Рис. 1. Глубокая модель для прогнозирования развития пожаров.

Вход в сеть состоит из матриц пикселей для каждого спектрального диапазона, пиксели отражают географическое местоположение объекта для каждого измерения. Так как необходимо найти метку для каждого пикселя, перекрестная проверка не применяется. Если

обучающий набор будет иметь низкое число выборок данных, это может привести к переобучению.

Предлагается использовать k -кратную перекрестную проверку, чтобы обеспечить точность разделения данных на обучающий набор и набор для тестирования, который будет использоваться в качестве эталонного. Это позволяет выбрать оптимальную настройку для модели и точную работу. Данные при этом делятся следующим образом: 80% для обучения модели, 10% для проверки и 10% для тестирования. Модель реализована на языке Python 3.6 с использованием библиотеки Keras. Экспериментальные оценки показывают высокую эффективность данного подхода с точностью обнаружения 94 %.

Для решения данных проблем предлагается пакетная нормализация слоев, чтобы увеличить возможности по обучению данных, а также перекрестный выход классификации. Сначала изображение делится на участки по 12 пикселей, поскольку минимальная площадь возгорания для набора данных о пожаре составляет 144км² с 50%-м перекрытием. Нормализация выполняется отдельно для каждого спектрального диапазона путем вычитания среднего значения для каждого пикселя изображения.

Чтобы сохранить пространственные связи между областями в одном изображении, рассчитываем координаты центрального пикселя каждой области изображения в качестве входных сверточного модуля. Выход модели можем положительным или отрицательным.

Модуль свертки предназначен для фиксирования пространственной зависимости при одновременном снижении сложности сети. Он включает две операции: свертку и сглаживание. Входной сигнал подается через три сверточных слоя, в которых нейроны одного слоя связаны с несколькими нейронами другого слоя в пределах рецептивного поля. Сверточные слои становятся меньше, когда они находятся на более глубоком уровне для извлечения сжатых и абстрактных функций. Это позволяет анализировать локальную пространственную зависимость между пикселями независимо от их фактического местоположения на двумерном изображении по сравнению с полносвязанными сетями.

Для построения архитектуры были проведены эксперименты с различной глубиной сети (числом сверточных и рекуррентных слоев), различными размерами пакетов, ядра, количеством сверточных фильтров [1]. Проведен эксперимент с двумерными сверточными слоями, но такая структура ухудшила результаты классификации, что свидетельствует о пространственных зависимостях по спектральным полосам. Эмпирически подобрана глубина сверточного модуля из трех слоев.

Также при построении модели сети необходимо избегать переобучения. Открытых обучающих данных для приложений, специализированных для такой предметной области, как обнаружение лесных пожаров, недостаточно из-за требований экспертных знаний (для

маркировки пикселей) и реальных наблюдений (произошедшие пожары). Это может привести к переобучению, поскольку модель может быть слишком сложной, чтобы соответствовать небольшому количеству обучающих выборок. Для решения этой проблемы были протестированы следующие стратегии.

1. *Семантическая составляющая*. Изображение и его классификация являются инвариантными. Такие модификации, как поворот и зеркальное отображение, помогают увеличить объем обучающих данных без потери качества. Формально можно трансформировать каждую выборку данных в восьми различных шаблонах путем комбинирования.

2. *Регуляризация* – добавление ограничений к условиям с целью предотвратить переобучение. Пакетная нормализация используется до и после обработки с помощью сверточного модуля.

3. *Временная информация* – для эксперимента использованы спутниковые изображения, полученные в разные моменты времени. Увеличение входного сигнала на этапе подготовки данных позволит избежать переобучения модели.

Предлагается использовать k-кратную перекрестную проверку, чтобы обеспечить точность разделения данных на обучающий набор и набор для тестирования, который будет использоваться в качестве эталонного. Это позволяет выбрать оптимальную настройку для модели и точную работу. Данные при этом разделены следующим образом: 80% для обучения модели, 10% для проверки и 10% для тестирования.

Для регулирования параметров сети использован оптимизатор Adaptive Moment Estimation (Adam). Полученная сеть требует тонкой настройки трех гиперпараметров: скорость обучения, импульс коэффициента с параметром регуляризации и веса регуляризации слоев. С точки зрения анализа временных последовательностей одномерные сверточные сети показали результат, конкурентный с использованием рекуррентных сетей и часто его превышающий. Замена операции классической свертки на сверку в глубину усилила устойчивость модели к переобучению.

Заключение. Развитие высокоточных алгоритмов прогнозирования пространственно-временных процессов на основе факторально-динамического анализа больших массивов ретроспективных, текущих и экспертных данных возможно на основе исследования системных связей и закономерностей функционирования и развития ПСПС на основе комплексного применения глубоких сверточных и рекуррентных нейронных сетей к анализу данных ДЗЗ и электронных ландшафтных карт.

В статье предложены принципы построения эффективных глубоких сверточных моделей для решения задачи высокоточного прогнозирования развития пожаров,

практическое использование которых делает возможным повышение эффективности анализа. Разработанная архитектура нейронной сети одновременно интегрирует спектральную и пространственную информацию.

Нейросетевая модель состоит из нескольких модулей:

1) модуль ввода – передает данные изображений и информацию о погоде к последующим слоям;

2) сверточный модуль – рассчитывает пространственные и спектральные зависимости по пикселям данных;

3) модуль вывода – возвращает результат прогноза.

Система состоит из компонента обработки данных, компонента раннего прогнозирования лесных пожаров с использованием глубокого обучения для точного и надежного обнаружения в рамках репозитория глубоких нейросетевых моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямашкин С. А., Ямашкина Е. О, Коваленко С. М. Принципы построения сверточно-рекуррентной нейросетевой модели для прогнозирования пространственно-временных процессов // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 9. – С. 154–156.
2. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – Vol. 14, No. 5. – P. 778–782.
3. Tao Y., Gao X., A. Ihler Deep neural networks for precipitation estimation from remotely sensed information // 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). – Vancouver, 2016. – P. 1349–1355.
4. Yamashkin S. A., Kamaeva A. A., Yamashkin A. A. Matters of Neural Network Repository Designing for Analyzing and Predicting of Spatial Processes // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2021. – Vol. 12, № 5. – P. 17–22.
5. Zhang L. Zhang, B. Du Deep learning for remote sensing data: A technical tutorial on the state of the art // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. – 2016. – Vol. 4, № 2. – P. 22–40.

КАЛАБКИН А. А., КАЛАБКИН В. А., ИВЛИЕВ С. Н.
АНАЛИЗ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРОТОКОЛОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ
ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ

Аннотация. В статье рассматриваются возможные угрозы в сфере информационной безопасности при использовании PLC-технологий для светодиодных светильников. Делаются выводы о вероятности реализации известных угроз безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационная система, управление освещением, PLC-технологии, осветительные приборы, светильники со светодиодным модулем, лампа накаливания, люминесцентная лампа, экономичность потребляемой электроэнергии.

KALABKIN A. A., KALABKIN V. A., IVLIEV S. N.
ANALYSIS OF THREATS TO INFORMATION SECURITY OF PROTOCOLS
AND LIGHTING CONTROL SYSTEMS FOR LED LAMPS

Abstract. The article discusses possible threats in the field of information security when using PLC technologies for LED lamps. Conclusions are drawn about the likelihood of the implementation of known security threat.

Keywords: information security, information system, lighting control, PLC technologies, lighting devices, lamps with LED module, incandescent lamp, fluorescent lamp, efficiency of electricity consumed.

В области энергосбережения и энергоэффективности одним из наиболее современных направлений выступает внедрение систем интеллектуального управления. Наиболее эффективное решение – применение PLC-технологий (power line communications), или управление оконечными устройствами энергопотребления для светодиодных светильников [1].

Современные светодиодные светильники имеют ряд преимуществ, к которым можно отнести не только экономичность их использования, но и безопасность: корпус и электрические схемы LED-приборов герметичнее в сравнении с классическими светильниками со сменными лампами, особо высокая защита от искрения способствует снижению риска поражения электрическим током; долговечность: приборы, оснащенные светодиодами можно использовать в несколько раз дольше, чем традиционные (с газоразрядными лампами), при этом их срок эксплуатации может превышать порядка 100 000 часов; экологичность: характерной особенностью LED-светильников является

отсутствие в их конструкции ртути, галогенных соединений и других опасных веществ; простая эксплуатация: в течение гарантийного периода светильники не требуют ремонта и техобслуживания, утилизация которых по окончании срока эксплуатации осуществляется в обычном порядке; универсальное питание: характерна возможность подключения светодиодных светильников к стационарным электросетям и к альтернативным источникам питания – ветряным генераторам, аккумуляторным и солнечным батареям [2].

В целях сравнительной оценки эффективности применения светильников со светодиодным модулем (таблица 1) необходимо отметить, что при световом потоке, равном 900 Лм, потребляемая мощность электроэнергии LED-светильниками составляет от 10 до 12 Вт, что ниже потребляемой мощности люминесцентной лампы в среднем в 2 раза, лампы накаливания – в 7 раз [3]. Сравнивая осветительные приборы с указанной мощностью следует отметить низкий нагрев светодиодной лампы, прочную конструкцию, простоту установки, экологичность применения и длительный срок службы.

Таблица 1

**Получаемый световой поток при использовании ЛН-, ЛЛ-, LED-светильников
разной мощности потребляемой электроэнергии**

Лампа накаливания	Лампа люминесцентная	Лампа светодиодная	Световой поток
20 Вт	5–7 Вт	2–3 Вт	Около 250 Лм
40 Вт	10–13 Вт	4–5 Вт	Около 400Лм
60 Вт	15–16 Вт	6–10 Вт	Около 700 Лм
75 Вт	18–20 Вт	10–12 Вт	Около 900 Лм
100 Вт	25–30 Вт	12–15 Вт	Около 1200 Лм
150 Вт	40–50 Вт	18–20 Вт	Около 1800 Лм
200 Вт	60–80 Вт	25–30 Вт	Около 2500 Лм

В дополнение к вышеперечисленным преимуществам экономически выгодно использовать LED-светильники (с напряжением сети 36 В) со светодиодным модулем в сравнении с лампами накаливания. Полученные результаты представлены в таблице 2 [2].

**Определение экономической эффективности применения светодиодных ламп
в сравнении с лампами накаливания**

Наименование параметра	Лампа накаливания	Лампа светодиодная
Необходимое количество ламп	10	10
Мощность 1 лампы, Вт	75	10
Мощность используемого кол-ва ламп, Вт	750	100
Общее количество работы часов в день	7	7
Общее количество работы часов в год	2 555	2 555
Общее потребление э/энергии в день, кВт	5,250	0,700
Общее потребление э/энергии в год, кВт	1 916	256
Затраты на э/энергию за 1 год, руб. (2,6 руб/кВт)	4 982	664
Затраты, связанные с покупкой ламп, руб. (10 шт.)	120	1 470
Срок службы лампы, час	1 000	30 000
Затраты, связанные с приобретением и заменой перегоревших ламп за 1 год, руб.	120	0
Итого затрат за 1 год, руб.	5 222	2 134р.
Затраты, связанные с приобретением и заменой перегоревших ламп за 5 лет, руб.	1 533	0
Итого затрат за 5 лет, руб.	27 644	10 672

Полученные результаты свидетельствуют об экономической эффективности применения светодиодных ламп в сравнении с лампами накаливания. Годовая эффективность составит при этом 2,6 раза. Экономическая выгода при использовании LED-светильников в течение 5 лет составит 16 972 руб.

Таким образом, следует отметить необходимость и целесообразность организации использования светильников со светодиодным модулем в особых эксплуатационных условиях [2]. Такие светильники используют, как на промышленных предприятиях, так и в быту. При бытовом освещении применяют наиболее распространенный аналоговый протокол «1–10 В». К наиболее распространенным цифровым протоколам управления системами освещения относятся DMX и Dali [1].

Протоколы DMX и Dali позволяют управлять осветительными установками, где объекты управления могут располагаться на удалении от систем управления на расстоянии от нескольких сотен метров до нескольких километров [1].

Анализ угроз и нарушений безопасности необходимо проводить для связанных с безопасностью применений систем автоматического управления освещением с целью защиты, как от преднамеренных атак, так и от неумышленных изменений параметров функционирования [1].

Безопасность может быть достигнута с помощью компенсирующих мер обеспечения безопасности и выполнения защитных мероприятий, таких как физические (например, механические средства, электронные средства) или организационные [1].

Если связанные с безопасностью коммуникации являются частью PLC-систем, то существует возможность непреднамеренных изменений параметров сетевых устройств. Связанные с безопасностью коммуникационные устройства должны иметь средства защиты от непреднамеренных изменений.

На основании вышеизложенного была построена модель угроз для системы управления освещением по протоколу Dali, представленная в таблице 3.

Таблица 3

Модель угроз системы управления освещением

Описание угрозы	Содержание угрозы	Источник	Вероятность реализации угрозы
Угроза несанкционированного удаленного внеполосного доступа к аппаратным средствам	Угроза обусловлена невозможностью контроля над механизмом, реализующего функции удаленного доступа на аппаратном уровне, на уровне операционной системы, а также независимостью от состояния питания аппаратных устройств, т. к. данный механизм предусматривает процедуру удаленного включения/выключения аппаратных устройств	Внешний нарушитель с высоким потенциалом	Средняя
Угроза несогласованности правил доступа к большим данным	Угроза обусловлена недостаточностью мер по разграничению и согласованию доступа к информации различных пользователей в хранилище больших данных	Внутренний нарушитель с низким потенциалом	Высокая, для систем наружного освещения объектов большой площади
Угроза подмены беспроводного клиента или точки доступа	Угроза обусловлена слабостями механизма аутентификации субъектов сетевого взаимодействия при беспроводном доступе	Внешний нарушитель с низким потенциалом	Высокая, при наличии беспроводных сегментов сети

Угроза перехвата управления автоматизированной системой управления технологическими процессами	Угроза заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к информационной инфраструктуре за счет получения нарушителем права управления входящей в ее состав автоматизированной системой управления технологическими процессами путем эксплуатации уязвимостей ее программного обеспечения или слабостей технологических протоколов передачи данных	Внутренний нарушитель со средним потенциалом	Высокая
		Внешний нарушитель с высоким потенциалом	Маловероятна
Угроза перехвата вводимой и выводимой на периферийные устройства информации	Данная угроза обусловлена недостаточностью мер защиты информации от утечки и контроля потоков данных, а также невозможностью осуществления защиты, вводимой и выводимой на периферийные устройства информации с помощью криптографических средств	Внутренний нарушитель с низким потенциалом	Высокая
		Внешний нарушитель с низким потенциалом	Высокая
Угроза перехвата привилегированного потока	Угроза заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к потоку данных, созданного приложением с дополнительными привилегиями	Внутренний нарушитель со средним потенциалом	Маловероятна
		Внешний нарушитель со средним потенциалом	Средняя
Угроза перехвата исключения/ сигнала из привилегированного блока функций	Угроза заключается в возможности нарушителя получить права на доступ к защищаемой информации путем перехвата исключений/ сигналов, сгенерированных участком программного кода, исполняемого с повышенными привилегиями	Внутренний нарушитель со средним потенциалом	Средняя
		Внешний нарушитель со средним потенциалом	Маловероятна
Угроза перехвата одноразовых паролей в режиме реального времени	Угроза заключается в возможности получения нарушителем управления критическими операциями пользователя путем перехвата одноразовых паролей, высылаемых системой автоматически, и использования их для осуществления неправомерных действий до того, как истечет их срок действия (5–7 мин)	Внешний нарушитель со средним потенциалом	Средняя

Таким образом, на основании проведенного анализа следует сделать вывод о существовании значительной вероятности реализации всех известных угроз безопасности. Поэтому при проектировании систем управления освещением необходимо использовать дополнительные мероприятия и технические решения в целях компенсации рисков, связанных с реализацией представленных угроз, и максимально полно руководствоваться стандартами в области информационной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивлиев С. Н., Крылова С. Л., Шиков С. А. Анализ угроз информационной безопасности протоколов и систем управления освещением // Вестник Мордовского Университета. – 2018. – Том 28, № 1. – С. 85–94.
2. Калабкин А. А., Горбунов А. А. Анализ конструкции, особенностей и характеристик современных светодиодных светильников для низковольтных сетей // XLVIII Огарёвские чтения. Нац. исслед. Мордов. гос. университет им. Н. П. Огарёва. Материалы научной конференции. В 3-х частях. Составитель А. В. Столяров. Отв. за выпуск П. В. Сенин. – Саранск. 2020. Часть. 1. – С. 173–178.
3. Сысоева Е. А. Экономическая эффективность использования светодиодных ламп // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Инновационное развитие. – 2012. – №3 (21). – С. 119–123.

ЛАПШОВ М. О.
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТРИКИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ TM-30
В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСВЕЩЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается использование метрики цветопередачи TM-30 для проектирования освещения, а также применение некоторых инструментов проектировщика при работе со световым дизайном. Представлены аргументы в пользу необходимости стандартизации производителей светотехнической продукции согласно новой метрике цветопередачи.

Ключевые слова: индекс цветовой полноты спектра, область цветовой гаммы, индекс цветопередачи, технический меморандум TM-30, качество цветопередачи, уровни приоритета цветопередачи, концепции светового дизайна.

LAPSHOV M. O.
APPLICATION OF TM-30 COLOR
RENDERING METRIC IN LIGHTING DESIGN

Abstract. The article describes the use of the TM-30 color rendering metric for lighting design. Some tools for working with light design are described. Arguments are presented in favor of the need to standardize manufacturers of lighting products according to the new color rendering metric.

Keywords: spectrum color completeness index, color gamut area, color rendering index, technical memorandum TM-30, color rendering quality, color rendering priority levels, lighting design concepts.

В настоящее время современным способом оценки цветопередачи является использование индекса цветопередачи МКО Ra, который был предложен МКО в 1995 г. Однако исследования продемонстрировали несовпадение между оценками, проведёнными по этой методике, с оценками наблюдателей, особенно в случае СД освещения, так что эта методика расчётов была усовершенствована с учётом новых достижений в области колориметрии. Североамериканское светотехническое общество опубликовало технический меморандум TM-30, содержащий новый способ оценки цветопередачи белых источников света.

На сегодняшний день метрика цветопередачи TM-30, которая должна прийти на смену CRI (Ra) все еще продолжает набирать свою материальную базу. Так, Светотехническое сообщество Северной Америки (IESNA – Illuminating Engineering Society

of North America), опубликовало приложение Е к разработанному ранее техническому меморандуму ТМ-30 (в редакции ТМ-30-20). В данном меморандуме рассматриваются и обобщаются пять исследований, в которых использовались метрики ТМ-30 для прогнозирования субъективных визуальных результатов. Что еще более важно, в приложение Е ТМ-30 изложены исследования на основе простого набора рекомендуемых спецификаций, применимых к большинству вариантов внутреннего освещения [2]. В данной работе приведен анализ и описаны условия применения новой метрики для проектирования освещения. При использовании описанного ниже подхода, проектировщик может получить необходимую цветопередачу выбранного источника света после воплощения проекта в реальности. Цвета объектов, освещенные таким источником света будут именно такие, какие и были задуманы

Переход нормативной документации от CRI к ТМ-30 приведет к ощутимым изменениям во всей светотехнической отрасли. У производителей источников света появляется возможность маркировать свою продукцию в соответствие с истинным значением цветопередачи. Инженеры, архитекторы, дизайнеры освещения и другие специалисты в сфере светотехники теперь имеют адекватный стандарт цветопередачи, поэтому они могут целенаправленно подходить к проектированию освещения с желаемой цветопередачей, сводя к минимуму субъективную оценку наблюдателя.

В таблице 1 представлены три концепции светового дизайна при проектировании освещения: *Прогнозирование предпочтения, Насыщенность цвета и Точность передачи цвета*. Для каждой концепции светового дизайна задаются критерии спецификации для трех уровней приоритета.

Таблица 1

Рекомендуемые спецификации IESNA ТМ-30

Уровень приоритета	Концепция светового дизайна						
		Прогнозирование предпочтения, Р		Насыщенность цвета, V		Точность передачи цвета, F	
	1	P1	$R_f \geq 78$ $R_g \geq 95$ $-1 \% \leq R_{cs,h1} \leq 15 \%$	V1	$R_f \geq 118$ $R_{cs,h1} \geq 15$	F1	$R_f \geq 95$
	2	P2	$R_f \geq 75$ $R_g \geq 92$ $-7 \% \leq R_{cs,h1} \leq 19 \%$	V2	$R_g \geq 110$ $R_{cs,h1} \geq 6\%$	F2	$R_f \geq 90$ $R_{f,h1} \geq 90$
	3	P3	$R_f \geq 70$ $R_g \geq 89$ $-12 \% \leq R_{cs,h1} \leq 23 \%$	V3	$R_g \geq 100$ $R_{cs,h1} \geq 0\%$	F3	$R_f \geq 85$ $R_{f,h1} \geq 85$

Приоритетный уровень 1 имеет самые строгие требования к цветопередаче, следовательно, он с наибольшей вероятностью будет соответствовать концепции светового дизайна. Недостатком при выборе 1-го приоритетного уровня является узкая номенклатура подходящих источников света, которые к тому же зачастую имеют низкую энергоэффективность. Приоритетный уровень 3 наоборот имеет самые низкие требования к цветопередаче. Соответственно, источники света, используемые на этом уровне, с меньшей точностью соответствуют замыслу дизайна. Проектировщик может определить требования по уровню приоритета цветопередачи светового дизайна согласно указаниям в техническом задании проекта.

Сочетание первой буквы концепции светового дизайна с номером уровня приоритета обеспечивает простой сокращенный метод подключения характеристик цветопередачи источника света к девяти спецификациям, приведенным в таблице 1. Например, источник света P1 соответствует критериям уровня приоритета 1 для концепции прогнозирования предпочтения, F2 соответствует уровню приоритета 2 для концепции дизайна основанной на точности передачи цвета, а «V →» – это источник, который не соответствует ни одному из уровней приоритета для ориентации дизайна по яркости. Важно отметить, что уровни приоритета являются совместимыми; таким образом, продукт, отвечающий уровню приоритета 1, всегда будет соответствовать требованиям уровня приоритета 2 и т. д.

Чтобы использовать таблицу 1, проектировщики должны ориентироваться только на четыре характеристики TM-30: R_f , R_g , $R_{cs,h1}$ и $R_{f,h1}$. Каждая из этих характеристик описана в таблице 2. Конечно, опытные проектировщики могут продолжать погружаться глубже изучение TM-30. Четыре характеристики – это серьезное увеличение по сравнению с одной или двумя характеристиками (R_a или R_f , R_g), которые ранее использовались для определения цветопередачи.

Концепции светового дизайна TM-30 охватывают субъективные оценки цветопередачи, естественности и прочих характеристик восприятия цвета. Такая метрика может стать отличным инструментом в руках проектировщика освещения для достижения действительно высокой цветопередачи в световом дизайне. Характеристиками TM-30, используемые для прогнозирования предпочтений, являются R_f , R_g и $R_{cs,h1}$.

Наиболее предпочтительные источники света вызывают смещение цвета по отношению к своему эталонному источнику в первую очередь за счет увеличения насыщенности красных цветов, это является очень важным фактором в оценке цвета и в психологическом восприятии в целом. Увеличение специально противодействует притупляющему эффекту, возникающему при уменьшении освещенности (эффект Ханта), таким образом делая цвета более похожими на те, что они появляются при эталонном

освещении [3]. Из-за этого предпочтительность цвета нельзя передать только помощью метрик точности цветопередачи. R_{cs} , h_1 и R_g являются важными дополнениями к спецификации. Тусклые или насыщенные цвета возможны при одинаково высоком значении R_f у источника света.

Таблица 2

Описание четырех характеристик TM-30

Метрика	Характеризует	Толкование	Возможные значения	Типичные значения
R_f , индекс точности воспроизведения цвета	Сходство с эталонным источником света для всех цветов	Значения ближе к 100 указывают на более близкое сходство с эталоном	От 0 до 100	От 60 до 100
R_g , индекс цветовой гаммы	Среднее измерение цвета для всех цветов	Значение выше 100 означают повышенную цветовую гамму, значения ниже 100 – пониженную	От 0 до 150	От 80 до 120
R_{cs}, h_1 , сдвиг цветности в красной области	Средний относительный сдвиг в цветности красного оттенка	Значение выше 0 % – увеличение цветности; значение ниже 0 % – уменьшение	- 95 % до 85 %	-20 % до 20 %
R_f, h_1 , точность воспроизведения цвета в красной области	Средняя точность внешнего воспроизведения красного оттенка	Значение ближе к 100 указывают на большее сходство с эталоном	От 0 до 100	От 60 до 100

Ценность стандарта IES TM-30 заключается в том, что после многих лет наконец-то была создана действительно работающая технология оценки цветопередачи. Большинство проектировщиков освещения руководствуются сводом правил – СП 52.13330.2016 [1]. По данной нормативной документации цветопередача источников света регламентируется по индексу цветопередачи CRI (R_a). Но, как было описано ранее, современные светодиодные источники света некорректно регламентировать по CRI. Согласно Приложению И, таблице И.1 из СП52.13330.2016 при выполнении зрительных работ по контролю цвета с очень высокими требованиями к цветоразличению, качество цветопередачи отличное (контроль готовой продукции на швейных фабриках, тканей на текстильных фабриках, сортировка кожи, подбор красок для цветной печати и т.п.) индекс цветопередачи источников света R_a

должен быть в пределах 90-100. Но как описывалось ранее такая характеристика утратила актуальность и технически устарела.

Таким образом становится очевидно, что необходима актуализация редакции нормативной документации для искусственного освещения, и логично если бы это проводилось совместно со Светотехническим сообществом Северной Америки, разработавшим новый стандарт цветопередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 7 ноября №777/приведен в действие 8 мая 2017 г. Зарегистрирован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Пересмотр СП 52.13330.2011 «СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение. – М. : Росстандарт, 2016. – 106 с.
2. Rea M., Freyssinier-Nova J. P. Color rendering: A tale of two metrics // Color Research and Application. – Vol. 33. – 2008. – P. 192–203.
3. Deng L., Chen L., Rea M. S. An evaluation of the Hunt94 color appearance model under different light sources at low photopic to low mesopic light levels // Color Research and Application. – Vol. 30. – 2005. – P. 107–117.

ВОЛКОВ А. В., СЕМЕНОВ А. Д., СЕМЯХИНА Е. Д.
ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ
НА ПРИМЕРЕ НАТРИЕВОЙ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. Поставлена задача и разработан алгоритм нейросетевой параметрической идентификации нелинейных динамических моделей объектов с проведением на модели вычислительного эксперимента путем вариации идентифицируемых параметров, формированием на его основе обучающих выборок, последующим последовательным обучением двух нейронных сетей, осуществляющих биективное отображение параметров исходной модели в выходные переменные второй нейронной сети. Проведена оценка эффективности предложенного алгоритма на примере параметрической идентификации нелинейной модели натриевой лампы высокого давления.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, нелинейный объект, нейронные сети, биективное отображение.

VOLKOV A. V., SEMENOV A. D., SEMYAKHINA E. D.
PARAMETRIC IDENTIFICATION OF NONLINEAR MODEL:
A STUDY OF HIGH-PRESSURE SODIUM LAMP

Abstract. The problem was posed and an algorithm developed for neural network parametric identification of nonlinear dynamic models of objects with a computational experiment on the model by varying the identified parameters. The training samples were formed on its basis, followed by sequential training of two neural networks that bijectively map the parameters of the original model into the output variables of the second neural network. The efficiency of the proposed algorithm is estimated using the example of parametric identification of a nonlinear model of a high-pressure sodium lamp.

Keywords: parametric identification, nonlinear object, neural networks, bijective mapping.

Для идентификации нелинейных объектов разработано довольно много подходов и методов [1; 2]. Однако они не позволяют напрямую оценивать параметры нелинейной динамической модели.

Современные эвристические методы минимизации невязки расчетных и экспериментальных данных по параметрам модели [3] позволяют достаточно быстро получать результаты приемлемого качества, но не гарантируют нахождение однозначного решения идентификационной задачи.

Использование для этих целей нейронных сетей [4–7] показывает, что параметрическая идентификация в принципе возможна, но для нелинейных объектов

требуется «индивидуальный» подход в выборе типа, структуры, состава и алгоритма обучения сети, что в общем случае представляет собой достаточно сложную задачу. Ниже рассмотрен оригинальный метод параметрической идентификации, основанный на последовательном обучении нейронных сетей. Данный метод позволяет декомпозировать задачу идентификации и за счет этого сделать более технологичной процедуру идентификации.

1. Постановка задачи идентификации

Дана математическая модель динамического нелинейного объекта (системы):

$$F(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}) = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$ – векторы переменных состояния и их производные, $\mathbf{y}, \mathbf{u}$ – векторы выходных и входных переменных; $\boldsymbol{\theta}$ – вектор параметров модели.

Заданы экспериментальные осциллограммы переменных системы (1)

$$\mathbf{x}_э = \mathbf{x}(t); \mathbf{y}_э = \mathbf{y}(t); \mathbf{u}_э = \mathbf{u}(t). \quad (2)$$

Используя модель динамического нелинейного объекта или системы (1) и экспериментальные данные (2) необходимо найти отображение

$$[\mathbf{x}_э, \mathbf{y}_э, \mathbf{u}_э] \Rightarrow \hat{\boldsymbol{\theta}}, \quad (3)$$

где $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ – оценка параметров модели, минимизирующая неувязку E_m параметров $\boldsymbol{\theta}$, взятых относительно их номинальных значений $\boldsymbol{\theta}_н$: $\boldsymbol{\theta}_о = \boldsymbol{\theta} / \boldsymbol{\theta}_н$

$$E_m = \min |\boldsymbol{\theta}_о - \hat{\boldsymbol{\theta}}_о| \quad (4)$$

2. Алгоритм параметрической идентификации

Предлагается следующий алгоритм получения отображения (3).

1. На математической модели (1) при варьировании параметров $\boldsymbol{\theta}$ проводится эксперимент (например, полнофакторный эксперимент 2^N , где N – размерность вектора $\boldsymbol{\theta}$), и формируется выборка параметров модели $\boldsymbol{\Theta}$ и выборки с массивом входов $\mathbf{P}_r$ и массивом выходов $\mathbf{T}_r$ для построения имитационных моделей:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_r &= [\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}]; \\ \mathbf{T}_r &= \mathbf{Y}; \\ \mathbf{X} &= \mathbf{X}(t); \mathbf{Y} = \mathbf{Y}(t); \mathbf{U} = \mathbf{U}(t), \end{aligned} \quad (5)$$

2. где $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}$ – массивы расчётных данных, включающие все переменные модели, полученные в каждом из N опытов плана эксперимента.

3. На выборке $\mathbf{P}_r, \mathbf{T}_r$ осуществляется построение имитационной модели и формируется матрица ее параметров $\mathbf{W}_r$. В качестве имитационной модели используется нейронная сеть, у которой роль идентифицируемых параметров играют синаптические коэффициенты $\mathbf{W}_r$, хотя, в принципе, можно использовать любую динамическую модель.

4. Формируется новая обучающая выборка для обучения второй статической нейронной сети:

$$\begin{aligned} P_c &= W_k; \\ T_c &= \Theta, \end{aligned} \quad (6)$$

5. Проводится обучение второй статической сети, и вычисляется оценка вектора параметров $\hat{\theta}$ модели (1) в каждом из N экспериментов.

6. На вход полученной имитационной модели (первую обученную нейронную сеть) подаются экспериментальные осциллограммы (2), которые не участвовали обучающих экспериментах, и вычисляется вектор параметров имитационной модели (синаптические коэффициенты нейронной сети) w_r для текущего состояния объекта.

7. Полученные коэффициенты подаются на вход второй нейронной сети и вычисляется оценка вектора параметров модели для текущего состояния реального объекта $\hat{\theta}$.

Таким образом, осуществляется биективное отображение множества параметров первой нейронной сети W_k во множество параметров модели объекта Θ .

3. Формирование модели нелинейного объекта

В качестве примера рассмотрим параметрическую идентификацию натриевой лампы высокого давления типа ДНаЗ мощностью 600 Вт, функционирование которой описывается нелинейной динамической моделью.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \frac{1}{L} \left[U_s - \left(\frac{1}{x_2 x_3} + R \right) x_1 \right], \\ \frac{dx_2}{dt} &= A_l U_0^2 x_2^2 \frac{\left(\frac{x_1}{U_0 x_2 x_3} \right)^2 - 1}{1 + k_1 \left(\frac{|x_1|}{U_0 x_2 x_3} - 1 \right)}, \\ \frac{dx_3}{dt} &= \left[k_2 + k_3 \left(\frac{|x_1|}{U_0 x_2 x_3} \right)^{k_4} \right] \left[1 + k_1 \left(\frac{|x_1|}{U_0 x_2 x_3} - 1 \right) - x_3 \right], \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где x_1 – ток лампы; x_2 – приведенная проводимость лампы, учитывающая среднее значение концентрации электронов; x_3 – безразмерная величина, учитывающая подвижность электронов; L , R – соответственно индуктивность и активное сопротивление ограничивающего дросселя; U_s , U_0 – соответственно напряжение питающей сети и номинальное напряжение на лампе; A_l – коэффициент, определяемый конструкцией лампы; k_1 – k_4 – электрические коэффициенты, определяемые для конкретного типа лампы.

Параметры лампы приведены в табл.3, параметры дросселя $R=14$ Ом; $L=0,062$ Гн [8],

Решение уравнений (7) проводился в среде MATLAB. Расчётные и экспериментальные осциллограммы напряжения и тока лампы показаны на рисунке 1.

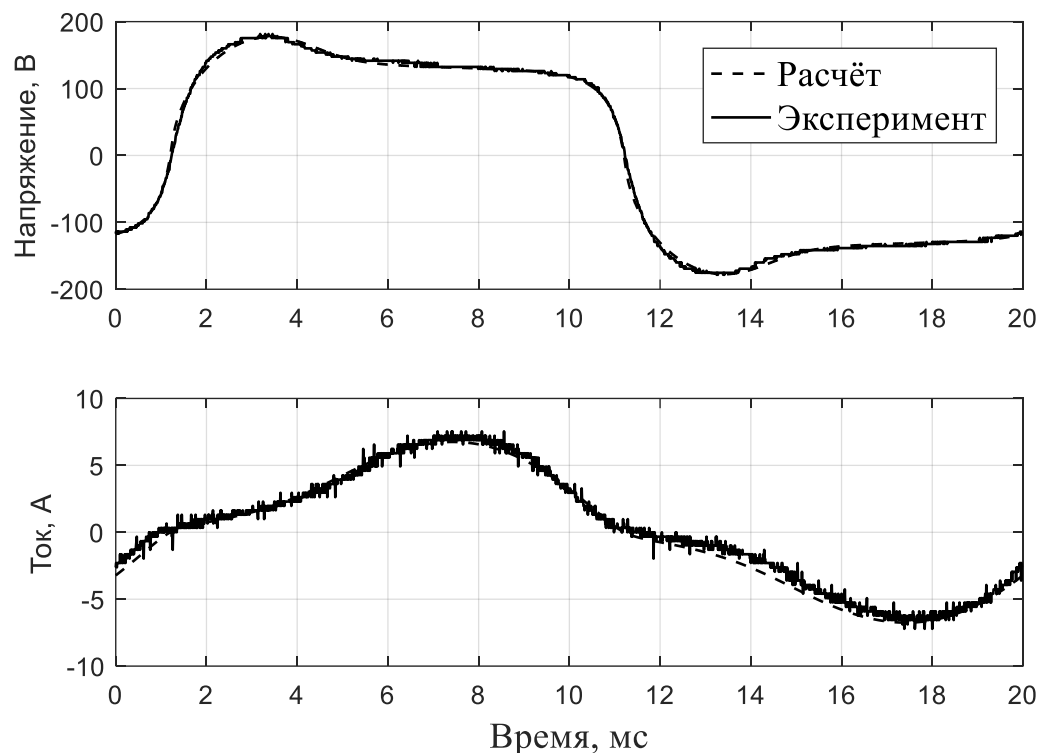


Рис. 1. Расчётные и экспериментальные осциллограммы напряжения и тока лампы.

Это подтверждает адекватное описание объекта системой уравнений (7). Поэтому для демонстрации эффективности предлагаемого метода нотификации используем в дальнейшем экспериментальные осциллограммы (2), полученные численным решением системы уравнений (7).

4. Параметрическая идентификация нелинейной модели объекта

Параметрическая идентификация осуществлялась в соответствии с предложенным алгоритмом:

1. Был проведен эксперимент, в ходе которого случайным образом в ограниченном диапазоне изменялись параметры модели (7) (таблица 1).

План эксперимента

№ опыта/ переменная	U_0	A_1	K_1	$K_2 \times 10^4$	$K_3 \times 10^4$	K_4
1	136,2374	5,5335	0,6680	1,5546	3,2885	1,5107
2	135,7986	5,5887	0,6029	1,6960	3,0672	1,5979
3	147,5063	5,5083	0,6133	1,5694	3,1564	1,5831
4	145,7572	5,5269	0,6423	1,7191	3,3771	1,5418
5	148,1105	5,5645	0,6376	1,5764	3,1713	1,5482
6	131,4503	5,5425	0,6313	1,5646	3,0715	1,5423
7	139,4691	5,5091	0,6266	1,5615	3,1124	1,5440
8	131,1343	5,5602	0,6387	1,8664	3,0005	1,5462
9	136,7500	5,5091	0,6576	1,7733	3,2186	1,5426
10	143,2692	5,5582	0,6541	1,8480	3,1059	1,5318

В каждом опыте проводилось численное решение системы (7), и по рассчитанным напряжению U_l и току I_l лампы формировалась обучающая выборка (5), которая в рассматриваемом примере имеет вид:

$$\begin{aligned} P_r &= [U_l, I_l]; \\ T_r &= I_l, \end{aligned} \quad (8)$$

где U_l, I_l – массивы осциллограмм токов и напряжений на лампе, полученных в результате решения системы (7) в каждом из опытов, задаваемых таблицей 1.

Вопрос: как обозначены U_l, I_l в системе уравнений (7)? (Ток – переменная x_1 , напряжение на лампе – переменная U_0).

2. Выборка (8) использовалась для обучения двухслойной нейронной сети прямой передачи с 2 нейронами в скрытом слое и с линейными функциями активации в каждом слое. Таким образом, первая нейронная сеть имеет 2 синаптические связи в скрытом слое, 1 – в выходном и 2 коэффициента сдвига. Обучение сети проводилось по методу Левенберга-Маркварта с регуляризацией по Байесу. Ошибка обучения в каждом опыте практически равнялась нулю. Максимальное значение ошибки не превышало значение 2×10^{-10} А.

3. Из полученных синаптических коэффициентов динамической нейронной формируется новая обучающая выборка для обучения второй статической нейронной сети. В таблице 2 приведены синаптические коэффициенты сети, полученные в результате обучения первой нейронной сети по данным таблицы 1 и последующего численного решения (7).

Обучающая выборка статической нейронной сети
(синаптические коэффициенты динамической нейронной сети)

№ опыта / коэф.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Экс.
iwI_1	0,1766	0,6514	0,4177	0,1359	–	0,0802	–	–	0,5468	–	–
					0,2045		0,0223	0,3555		0,6127	0,0652
	1,6867	–	–	1,7077	–	–	2,6223	–	0,7177	1,5596	1,0806
		0,6473	0,8001		1,5911	1,2301		2,3779			
	0,0735	–	–	0,1276	–	0,2594	–	0,3422	1,3720	–	0,1374
		0,0824	0,2155		0,2188		0,1059			0,0132	
iwI_1	–	–	0,3008	–	0,0329	–	0,0777	–	0,5716	0,1266	0,2285
	0,3327	0,3907		0,3238		0,5883		0,6251			
	0,0716	–	0,3082	–	0,0953	–	0,0138	–	–	0,0153	0,6529
		0,6689		0,0062		0,0249		0,0822	0,2940		
	0,3149	0,7860	0,5773	–	0,5312	–	–	–	0,0006	0,4952	–
				0,4153		0,0028	0,0305	0,0315			0,5880
iwI_1	–	0,1492	–	0,3497	–	0,1310	0,1631	0,1926	–	0,8928	–,0615
	0,1726		0,8230		0,2942				0,2865		
	1,8399	1,7404	–	–	0,6604	0,4250	–	–	1,0078	0,3248	–
			0,4187	1,2906			0,4964	1,0430			1,3381
	–	–	0,4246	0,3284	–	0,4235	0,7739	–	–	0,0193	0,1297
	0,0719	0,0189			0,3147			0,1854	0,7189		
Iw_2	0,3252	–	–	–	0,0473	–	–	0,3386	–	–	0,2156
		0,0895	0,5926	0,8332		0,9608	0,5675		0,2995	0,1845	
	–	–	–	–	0,1370	–	–	0,0445	0,1540	–	0,6162
	0,0699	0,1532	0,6072	0,0159		0,0406	0,1005			0,0224	
	–	0,1800	–	–	0,7640	–	0,2226	0,0171	–	–	–
	0,3077		0,1375	1,0687		0,0046			0,0003	0,7217	0,5549
b_1	0,7162	–	–	0,7157	–	0,8455	–	0,4559	0,4969	–	0,4002
		0,1006	0,3167		0,9204		0,8275			0,8803	
b_1	0,7329	0,4394	–	–	0,6400	–	–	0,8415	0,9483	–	0,4241
			0,6683	0,2781		0,5178	0,1132			0,6041	
	–	–	–	0,1046	–	0,7231	–	0,3004	0,3473	–	–
b_1	0,0740	0,7109	0,5874		0,2845		0,8304			0,7435	0,3563
	0,7870	0,3743	–	0,7948	0,1287	0,4130	–	–	0,4390	–	–
b_2			0,1682				0,4933	0,6826		0,7484	0,5076
	0,3909	0,3720	–	–	0,7151	–	0,6461	0,9997	–	–	–
			0,8988	0,3189		0,2607			0,5413	0,1565	0,0727

4. Таблица 2 использовалась для обучения второй статической нейронной сети, в качестве которых была выбрана трехслойная сеть прямой передачи также с линейными функциями активации в каждом слое. Обучение сети также проводилось аналогично по

методу Левенберга-Маркварта с регуляризацией по Байесу. Относительные ошибки обучения в каждом опыте показаны на рисунке 2.

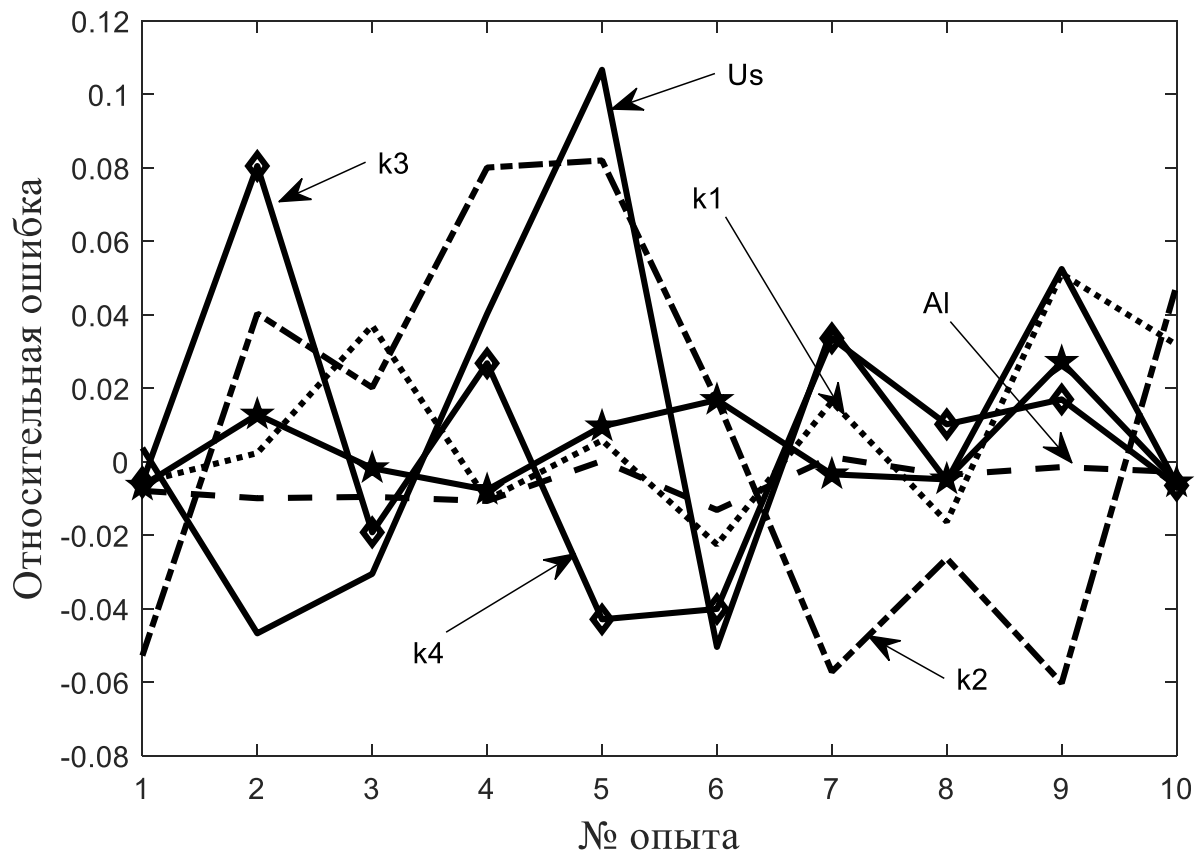


Рис. 2. Ошибки вычисления параметров аналитической модели (7), полученные после обучения.

5. На вход первой нейронной сети подвались экспериментальные значения тока и напряжения лампы и вычислялся вектор её параметров (последней столбец табл. 2).

Вычисленный вектор параметров первой нейронной сети подавался на вход обученной второй статической нейронной сети и вычислялась оценка вектора параметров модели реального объекта $\hat{\theta}$ (табл. 3).

Можно отметить хорошее совпадение расчётных данных модели (7) [9] с данными, полученными в результате идентификации, причём среднеквадратичное отклонение от экспериментальных значений тока и напряжения при идентификации даже меньше.

**Оценки параметров нелинейной модели,
полученные в результате идентификации**

Параметры	U_0	A_l	k_1	k_2	k_3	k_4	СКО Напряжени е	СКО Ток
Ед. изм.	В	1/Дж	-	1/с	1/с	-	В	А
Расчетные	127	5,5	0,6	$1,5 \times 10^4$	3×10^4	1,5	10.4401	0.697 5
Идентификац ия	126,72 4	5,483 5	0,539 4	$1,5907 \times 10^4$	$2,3676 \times 10^4$	1,420 3	4.3839	0.659 1

Выводы.

1. Поставлена задача параметрической идентификации нелинейных моделей объекта, заключающаяся в получении отображения экспериментальных данных объекта в параметры ее модели в её параметры с помощью нейронных сетей.

2. Разработан алгоритм параметрической идентификации, заключающийся в проведении вычислительного эксперимента на заданной нелинейной модели, формирования по результатам эксперимента обучающих выборок, последовательного обучения нейронных сетей, и вычисления с помощью обученных сетей оценок параметров нелинейной модели по экспериментальным данным.

3. Предложена нейронная сеть, состоящая из комбинации двух нейронной сетей, в которой синаптические коэффициенты первой нейронной сети подаются на вход статической нейронной сети.

4. В такой сети отображение экспериментальных данных в параметры модели осуществляется последовательно: экспериментальные данные вначале отображаются в синаптические коэффициенты первой нейронной сетью, затем синаптические коэффициенты этой сети биективно отображаются в параметры второй статической нейронной сети, выходом которой являются параметры нелинейной модели.

5. Экспериментальная проверка предложенного метода нейросетевой параметрической идентификации на примере модели натриевой лампы высокого давления показала, что среднеквадратичное отклонение тока и напряжения от номинальных значений не превышает 4% для напряжения и 10% для тока.

6. Учитывая хорошую отображающую способность нейронных сетей, предложенный алгоритм и нейронную сеть можно рассматривать как универсальный метод идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цибизова Т. Ю. Методы идентификации нелинейных систем управления // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 (Ч. 14). – С. 3070–3074.
2. Пупков К. А. Капалин В. И., Ющенко А. С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. – М. : Наука, 1976. – 448 с.
3. Ходашинский И. А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // Проблемы управления. – 2009. – № 9. – С. 15–23.
4. Бендерская Е. Н., Никитин К. В. Рекуррентная нейронная сеть как динамическая система и подходы к её обучению // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2013. – № 4 (176). – С. 29–39.
5. Schrauwen B., Verstraeten D., Campenhout J. V. An overview of reservoir computing theory, applications and implementations // Proc. of the 15th European Symp. on Artificial Neural Networks. – 2007. – P. 471–482.
6. Федоров М. М. Использование нейросетевых методов для решения задач идентификации объектов [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации. – 2013. – № 9. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2013/09/26285> (дата обращения: 23.03.2019).
7. Шумихин А. Г. Бояршинова А. С. Применение нейросетевых динамических моделей в задаче параметрической идентификации технологического объекта в составе системы управления // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – Пермь. – № 3. – 2015. – С. 21–38.
8. Харченко В. Ф., Ягуп В. Г., Якунин А. А. Разработка компьютерной модели для разрядной лампы высокого давления // Світлотехніка та електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 52–57.
9. Semenov A. D., Volkov A. V., Shchipakina N. I. Operational control algorithm of parameters of high-pressure sodium lamps based on a statistical time series model [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – No. 971(3), 032084. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/971/3/032084> (дата обращения: 20.09.2021).

ПОПКОВА С. С., НИКУЛИН В. В.

ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ ОХРАННОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Аннотация. В статье представлен сравнительный обзор датчиков, которые используются в охранных системах, произведен их анализ. Сделаны выводы о необходимости совместного применения датчиков, использующих различные принципы действия.

Ключевые слова: система безопасности, система контроля, охранная сигнализация, датчики, охраняемый периметр, охраняемый объект.

POPKOVA S. S., NIKULIN V. V.

SENSORS IN SECURITY ALARM SYSTEMS

Abstract. The article presents a comparative overview of sensors that are used in security systems, their analysis is made. Conclusions are made about the need for the combined use of sensors using different principles of operation.

Keywords: security system, control system, burglar alarm, sensors, guarded perimeter, protected object.

Охранная сигнализация – это совокупность совместно действующих технических средств, предназначенных для обнаружения проникновения (попытки проникновения) на охраняемый объект, обнаружения нештатных (чрезвычайных) ситуаций на объекте, обеспечивающая сбор, обработку, передачу и представление в заданном виде служебной информации и информации о проникновении (попытки проникновения) [1].

Любая система охранной сигнализации состоит из трех составляющих:

1. датчики;
2. приемно-контрольные приборы;
3. исполнительные устройства.

Обычно несколько датчиков объединяются в систему в зависимости от размеров охраняемого объекта и требуемого уровня надежности защиты [2–5].

Датчики, которые используются в системах охранных сигнализаций, различаются по принципу действия, назначению и еще по целому ряду характеристик. Классификация по типу обнаруживаемых тревожных событий представлена на рисунке 1.

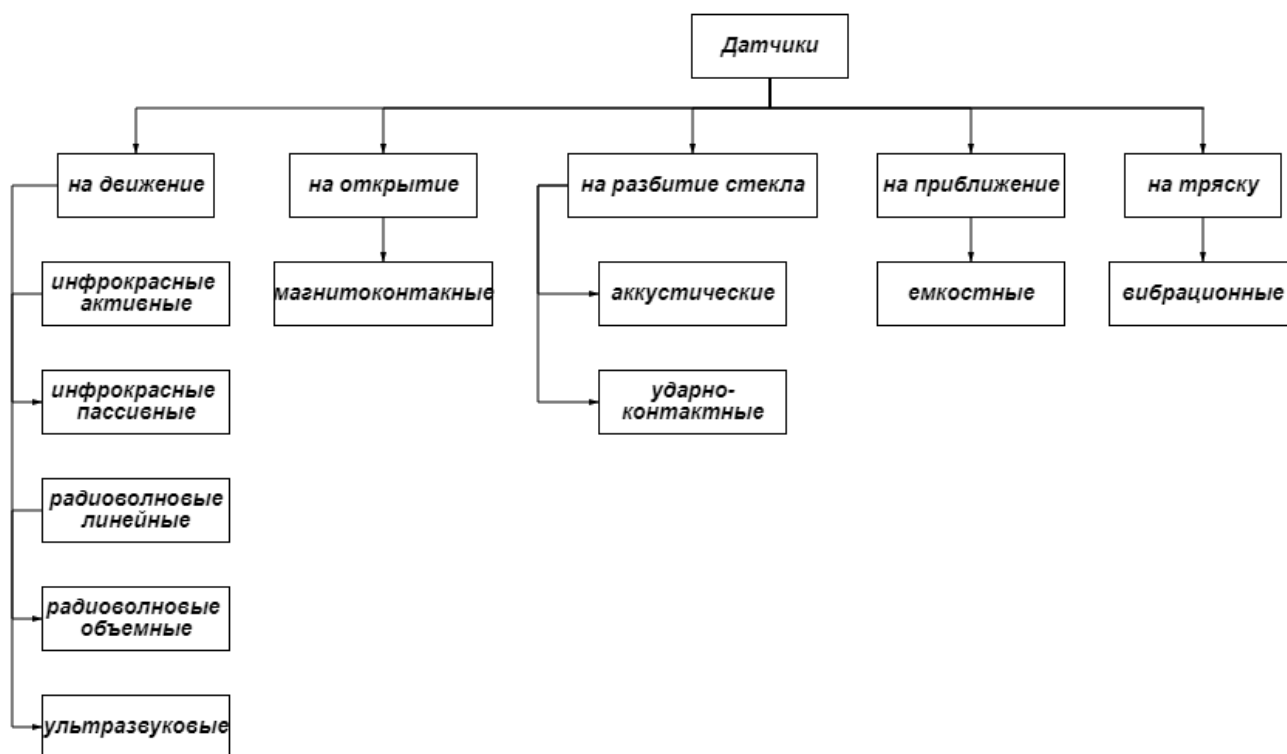


Рис. 1. Классификация по типу обнаруживаемых тревожных событий.

Датчики, которые срабатывают на движение:

1. *Инфракрасные активные датчики.* Эти датчики представляют собой систему, состоящую из инфракрасного передатчика (излучателя) и инфракрасного приемника. Они формируют собой охранный периметр протяженностью до 100 м. Бывают однолучевыми и многолучевыми. Если количество лучей больше 2, то снижается шанс ложного срабатывания, так как датчик формирует сигнал тревоги только в том случае, когда происходит пересечение всех лучей.

2. *Инфракрасные пассивные датчики.* Такие датчики относятся к одним из самых распространенных. Они зачастую используются для обнаружения проникновения в закрытое помещение. Различают два типа датчиков – настенный и потолочный. Первый вариант является самым распространенным, в виду легкости установки. В комплект настенных датчиков уже входят все комплектующие, включая в себя кронштейны, которые позволяют перемещать датчик в любом направлении. Второй тип датчиков, потолочный, чаще используется в малых помещениях.

3. *Радиоволновые линейные датчики.* Такие датчики обеспечивают обнаружение человека в охраняемом периметре. Датчик состоит из приемника и передатчика, которые расположены на разных концах охраняемого периметра. Они обнаруживают движение внутри охраняемого периметра и формируют сигнал тревоги.

4. *Радиоволновые объемные датчики.* Такие датчики предназначены для обнаружения проникновения в охраняемое помещение и допускают маскировку материалами, пропускающими радиоволны. Электромагнитное поле, создаваемое датчиками, не оказывает вредного воздействия на организм человека на расстоянии более 50 мм. В отличие от линейных датчиков, тут важна ширина охраняемого периметра.

5. *Ультразвуковые датчики.* Эти датчики предназначены для обнаружения проникновения и перемещения предметов внутри охраняемого периметра. Датчики состоят из блока обработки сигналов, акустического передатчика и акустического приемника. В передатчике находится пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь, который посылает импульсы ультразвуковых колебаний в охраняемом периметре. В приемнике находится обратный преобразователь колебаний в электрический сигнал [6; 7]. Блок обработки сигналов, в зависимости от алгоритма, заложенного в него, формирует и посылает сигнал тревоги.

Таблица 1

Сравнение принципов работы датчиков движения

Тип	Принцип работы
Инфракрасные пассивные датчики	Изменения теплового излучения, происходящие при пересечении границы наблюдения, регистрируются, и происходит превращение инфракрасного излучения в электрический сигнал. Этот сигнал анализируется с точки зрения амплитуды и времени и датчик создает тревогу.
Инфракрасные активные датчики	Создается импульсное инфракрасное излучение, которое захватывает приемник. При пересечении границы наблюдения инфракрасное излучение перестает поступать на приемник, и датчик создает тревогу.
Радиоволновые линейные датчики	Передатчик излучает электромагнитные колебания в направлении приемника. Приемник принимает эти колебания и анализирует полученные характеристики амплитуды и времени, и если они соответствуют модели нарушителя, включённой в алгоритм обработки информации, то датчик создает тревогу.
Радиоволновые объемные датчики	Реализует принцип обнаружения человека путем регистрации сдвига частоты Доплера отраженного сигнала ультравысокой частоты, который возникает, когда человек движется в электромагнитном поле, формируемого модулем охраны.
Ультразвуковые датчики	В основе лежит пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь, работающий в режиме ультразвука. С выхода приемника сигнал поступает в блок обработки сигналов, который в зависимости от алгоритма, который находится внутри нее, создает тревогу.

Исходя из данных, представленных в таблице 1 и краткого описания, сделанного ранее, можно сделать о датчиках движения следующие выводы.

1. В отличие от объемных датчиков для линейных датчиков не важна ширина охраняемой зоны. Гораздо большее значение имеет ширина зоны отчуждения, за пределами которой сигнал тревоги срабатывать не будет.

2. Среди инфракрасных датчиков наибольшее распространение нашли пассивные датчики, а именно настенные. Это связано с тем, что настенные датчики можно регулировать в широких пределах с помощью кронштейнов, которые присутствуют в комплектах поставки.

Недостатком датчиков, которые срабатывают на движение, является то, что они работают только внутри охраняемого периметра уже после проникновения туда нарушителя, не реагируя на другие негативные факторы. Поэтому следующий тип – это датчики, которые срабатывают на открытие – *магнитоконтактные датчики*. Они используются для блокировки окон и дверей охраняемого объекта. В основе таких датчиков лежит геркон и магнит. По типу установки различают накладные и врезные. Корпуса изготавливаются из разных материалов от металла до пластика.

Но не всегда нарушитель может проникнуть на охраняемый периметр путем открытия двери или оконного проема, иногда это происходит путем разбития стекла, тогда в ход идут датчики, реагирующие на разбитие стекла:

1. *Акустические охранные датчики*. Такие датчики используют для обнаружения разбития самого разного типа стекла – от обычного до трехслойного закаленного. В основе работы датчиков лежит конденсаторный электретный микрофон со встроенным усилителем на транзисторе. Микрофон преобразует колебания в электрический сигнал, который через полосовые усилители поступает на микроконтроллер, который в свою очередь в соответствии с помещенным в него алгоритмом производит анализ и, в случае соответствия заданному, подает сигнал тревоги [8].

2. *Ударно-контактные датчики*. Такие датчики работают по принципу обнаружения разрушения стекла и устойчивы к неразрушающим воздействиям на стекло, например на низкочастотные колебания от автомобилей, поездов и тому подобное. Принцип действия заключается в размыкании подвижных контактов датчика вибрации, возникающих при разрушении стекла. Датчик это регистрирует и при нарушении целостности посылает сигнал тревоги.

Для того чтобы обезопасить охраняемый периметр задолго до того как нарушитель попадет в него используются датчики, которые срабатывают на приближение – *емкостные охранные датчики*. Их принцип работы основан на регистрации изменения состояния

чувствительного элемента, в качестве которого используется провод, размещённый по охранному периметру. При изменении электрической емкости по отношению к земле датчик подает сигнал тревоги.

Вибрационные датчики – датчики, которые срабатывают на тряску. Принцип работы основан на регистрации разрушения строительных конструкций. Происходит это за счет пьезоэлектрического эффекта, который происходит при вибрации. Электрический сигнал усиливается пропорционально вибрации, и датчик подает сигнал тревоги. Основной характеристикой является чувствительность к вибрации.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод, что ни один из видов датчиков не дает стопроцентной гарантии обнаружения проникновения и отсутствия ложных срабатываний. Поэтому гораздо эффективнее будет использовать в системах охранной сигнализации не один конкретный тип датчиков, а максимально стараться комбинировать их между собой, для достижения большего коэффициента полезного действия. Емкостные датчики позволяют обнаружить потенциального нарушителя охраняемого периметра, датчики, реагирующие на разбитие стекла или вибрационные датчики обнаружат нарушителя в момент его проникновения, а датчики движения зафиксируют нарушителя непосредственно в охраняемом периметре. Таким образом, совмещенные или комбинированные датчики позволяют одновременно контролировать несколько различных зон и, при появлении нарушителя в зоне охраняемого периметра, сработают сразу несколько различных типов датчиков, что позволит минимизировать ложные срабатывания системы в целом, при срабатываниях со стороны отдельных датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магауенов Р. Г. Системы охранной сигнализации. Основы теории и принципы построения. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2008. – 508 с.
2. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
3. Никулин В. В., Попкова С. С. Обзор существующих охранно-пожарных систем // «Радиочастотное планирование и электромагнитная совместимость». Материалы IV межрегионального вебинара. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2021. – С. 4–7.
4. Никулин В. В., Попкова С. С. Применение технологии интернета вещей для интеграции в охранно-пожарные системы сигнализации // Огарёвские чтения : материалы научной конференции: в 3 частях. – Саранск, 2021. – С. 292–297.
5. Рейкс Ч. Д. 55 электронных схем сигнализации. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 112 с.

6. Серебрякова И. И., Никулин В. В. Волоконно-оптические датчики. // XLIV Огаревские чтения : материалы научной конференции: в 3 частях. Ответственный за выпуск П. В. Сенин. – Саранск, 2016. – Часть 3. – С. 331–335.
7. Синилов В. Г. Системы охранной, пожарной и охранно-пожарной сигнализации; Академия – Москва, 2011. – 512 с.
8. Шарапов В. И, Мусиенко М. А., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.