

На правах рукописи



ВОЛКОВ Антон Владимирович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ
ЛАМП НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ
РЯДОВ, НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И SCADA – ТЕХНОЛОГИЙ**

**Специальность 05.13.06–Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (промышленность)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Семенов Анатолий Дмитриевич

Официальные оппоненты: **Шумихин Александр Георгиевич**,
доктор технических наук, профессор,
«Пермский национальный исследователь-
ский политехнический университет», про-
фессор кафедры оборудования и автомати-
зации химических производств, г. Пермь;

Семенов Михаил Евгеньевич
доктор физико-математических наук, про-
фессор, ФГБОУ ВО «Воронежский госу-
дарственный университет», профессор ка-
федры цифровых технологий, г. Воронеж

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», г. Самара

Защита состоится «31» октября 2019 г. в ____ часов на заседании диссер-
тационного совета Д 212.186.03 в Пензенском государственном университете
по адресу: 440026, Пенза, ул. Красная, д.40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и на сайте:
https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/volkov

Автореферат разослан «____» _____ 2019г.

Ученый секретарь
диссертационного

совета



Воячек Игорь Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие светотехнической промышленности в России в основном связано с усовершенствованием производственных и исследовательских предприятий этой отрасли. Существенную долю объемов производства составляют натриевые лампы высокого давления, которые являются одними из наиболее эффективных источников света.

До настоящего времени, как правило, реализуется ручной контроль ограниченного числа контролируемых параметров лампы – это приводит к быстрому утомлению оператора и появлению ошибок контроля, а ограниченное число контролируемых параметров снижает его достоверность. Архивирование информации о состоянии испытуемых ламп не производится, что затрудняет оценку причин возникновения брака и оперативность принятия решений по внесению корректировки технологического процесса изготовления ламп с целью исключения появления брака или улучшения их технических характеристик.

В связи с этим решение задач автоматизации контроля, обоснованного выбора контролируемых параметров, использование современных методов обработки контролируемой информации и её архивирование позволит существенно повысить эффективность выходного контроля ламп. Трудность решения вышеуказанных задач связана со сложностью физических процессов, протекающих в лампе, нелинейностью и приближенностью математических моделей, отображающих эти процессы, сложностью контроля некоторых физических переменных.

Преодоление трудностей контроля, связанных с приближенностью математических моделей и плохой наблюдаемостью физических переменных, в настоящее время успешно осуществляется в рамках задач интеллектуального контроля и управления. Значительный вклад в решение этих задач внесли работы отечественных (Цыпкин Я.З., Летов А.М., Моисеев Н.Н., Красовский А.А., Красовский Н.Н., Колмогоров А.Н., Бесекерский В.А., Попов Е.П., Воронов А.А. и др.), а также зарубежных (Винер Р., Эшби У., Калман Р., Заде Л., Месарович М., Изерман, Р., Остром К., Эйкхоффа П. и др.) ученых.

Практика разработки подобных систем показала, что создание программно-аппаратного обеспечения современных систем контроля и управления, соответствующего современному уровню, требует больших затрат времени и средств с привлечением высококвалифицированных специалистов. Поэтому задача создания информационно-алгоритмических структур и разработка на этой основе высокоэффективных систем контроля является актуальной.

Цель работы – повышение достоверности выходного контроля натриевых ламп высокого давления путем автоматизации процесса контроля и обоснованного выбора контролируемых параметров на основе методов статистического анализа с использованием временных рядов, нейронных сетей и SCADA -технологий.

Для достижения цели, поставленной в работе, необходимо решить следующие **задачи**.

1. Анализ методов выходного контроля газоразрядных ламп высокого давления и выявление причин, снижающих его достоверность.
2. Создание математических моделей газоразрядной лампы высокого давления, позволяющих получить уточненные характеристики физических процессов, происходящих в лампе.
3. Валидация разработанных математических моделей, дающая возможность осуществить обоснованный выбор алгоритмов и режимов управления процессом контроля для повышения его точности и достоверности.
4. Разработка алгоритмов контроля электрических параметров газоразрядной лампы высокого давления, основанных на методах анализа временных рядов.
5. Разработка системы контроля и испытания натриевых ламп высокого давления на базе современных программно-технических средств с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

Объект исследования: газоразрядные лампы высокого давления.

Предмет исследования: модели, алгоритмы и технические средства автоматизированного контроля и испытания ламп на основе анализа временных рядов и нейросетевых технологий.

Методы исследований. Исследования проводились на базе современной теории управления и автоматизации технологических процессов, теории вероятностей и математической статистики, математического моделирования, численных и экспериментальных методов.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена путем математических доказательств, математического моделирования, сходимостью данных теоретических и экспериментальных исследований, а также практическим внедрением разработанных систем управления в производство.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация выполнена в соответствии с требованиями специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность) Области исследования: 2 – Автоматизация контроля и испытаний; 4 – Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизации, 6 – Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления.

Научная новизна.

1. Математические модели натриевой газоразрядной лампы высокого давления, позволяющие повысить достоверность контроля за счет получения уточненных характеристик физических процессов, происходящих в лампе.

2. Метод параметрической идентификации нелинейной модели газоразрядной лампы, основанный на отображении параметров имитационных моделей в параметры исходной нелинейной модели с помощью многослойной нейронной сети с прямой передачей сигнала, позволяющей осуществить объективный выбор имитационной модели для последующего контроля.

3. Алгоритмы контроля электрических параметров газоразрядной лампы, позволяющие на основе анализа временных рядов, генерируемых системой контроля, с использованием сингулярного разложения и проверки статистических гипотез не только выявить дефекты, но и указать вероятную причину их возникновения.

4. Интегрированная система контроля и испытаний на базе современных программно-технических средств с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

Практическая ценность заключается в разработке современных научно обоснованных методов и средств контроля качества газоразрядных ламп высокого давления и повышении эффективности контроля.

1. Рассчитаны параметры нелинейной модели газоразрядной лампы, позволяющие получить уточненные характеристики физических процессов, происходящих в лампе, и определить контролируемые параметры.

2. Проведён обоснованный выбор контролируемых параметров и алгоритмов контроля, не только повышающих достоверность контроля, но и дающих возможность устанавливать вероятную причину возникающих дефектов.

3. Создана система контроля и испытаний на базе современных программно-технических средств с улучшенными технико-экономическими характеристиками, обеспечивающая повышение достоверности контроля, сокращение времени контроля на 29 % и позволяющая снизить число ошибок операторов.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные математические модели в виде методик, алгоритмов и программ внедрены в производство в ООО «Рефлекс-С» при проектировании и испытаниях натриевых ламп высокого давления, что позволило повысить производительность контроля различных типов ламп в 1,1 раза, а также используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» на кафедре «Информационная безопасность и сервис» и на кафедре «Информационно-измерительная техника и метрология» Пензенского государственного университета при подготовке бакалавров и магистров по направлению 22.04.00 «Управление в технических системах».

Данная работа поддержана и одобрена Программой «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.) в 2013–2015гг. от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект №157 ГУ1/2013 от 08.10.2013 г).

Диссертация подготовлена как часть прикладных исследований в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии №14.574.21.0143 с Министерством образования и науки Российской Федерации. Идентификатор Соглашения RFMEFI57417X0143.

На защиту выносятся:

- 1) математические модели натриевой газоразрядной лампы высокого давления, позволяющие повысить достоверность контроля за счет получения уточненных характеристик физических процессов, происходящих в лампе;
- 2) метод параметрической идентификации нелинейной модели газоразрядной лампы, основанный на отображении параметров имитационных моделей в параметры исходной нелинейной модели с помощью многослойной нейронной сети с прямой передачей сигнала, позволяющей осуществить эффективный выбор имитационной модели для последующего контроля;
- 3) алгоритмы контроля электрических параметров газоразрядной лампы высокого давления, дающие возможность выделять их регулярную, периодическую и случайную составляющие и тем самым устанавливать вероятную причину возникающих дефектов;
- 4) интегрированная система контроля и испытаний на базе современных программно-технических средств с улучшенными технико-экономическими характеристиками, отличающаяся от известных систем обоснованным введением контролируемых параметров, сокращением времени контроля и позволяющая снизить число ошибок операторов.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 конференциях различного уровня, в том числе, на молодежном научно-инновационном конкурсе «У.М.Н.И.К.» (Саранск, 2013), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 2010, 2012), Международной научно-практической конференции «Найновите научны постижения – 2014» (Болгария, София, 2014), XLV Огарёвских чтениях (Саранск, 2017), XI Международной научно-практической конференции (Пенза, 2017), IX Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, 2018).

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно представлены в 15 работах, из которых 1 работа опубликована в международной базе Scopus, 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (Научно-технический вестник Поволжья, Автоматизация и современные технологии), 11 работ – в журналах и сборниках международных научно-технических конференций и вестниках университетов, 1 работа опубликована без соавторов, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Доля личного участия соискателя составила 67 %.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 151 наименование, и приложения. Объем работы 265 страниц машинописного текста, включая 113 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены современные тенденции развития светотехники и светотехнической продукции. Описаны физические процессы, происходящие в лампе, а также процесс инициации лампы и способы питания. Рассмотрены технические требования и методы контроля параметров натриевых ламп высокого давления. Произведен анализ существующих систем выходного контроля параметров натриевых ламп высокого давления, а также выявлены направления и способы улучшения их качественных показателей за счет внедрения систем автоматического контроля.

Исследованию процессов работы газоразрядных ламп, внедрению систем автоматического контроля, анализу теоретических и экспериментальных исследований в этой области посвящены труды российских и зарубежных ученых В.М. Пчелина, А.В. Белякова, А.Н. Сухожак, А.Т. Кынина, У. Лоудена, К. Шмидта и др. Анализ методов и средств контроля параметров светотехнической продукции показал необходимость повышения качества контроля, предполагающего расширение методов и средств контроля.

Во второй главе разработаны четыре аналитические модели натриевой лампы, построенные на основе дифференциальных уравнений, модели проводимости лампы, метода матричных операторов, нейросетевых методов.

Математическая модель натриевой лампы как многосвязной системы построена в пространстве состояний и описывается системой дифференциальных уравнений третьего порядка в форме Коши:

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

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.

Расчетные и экспериментальные осциллограммы представлены на рисунке 1.

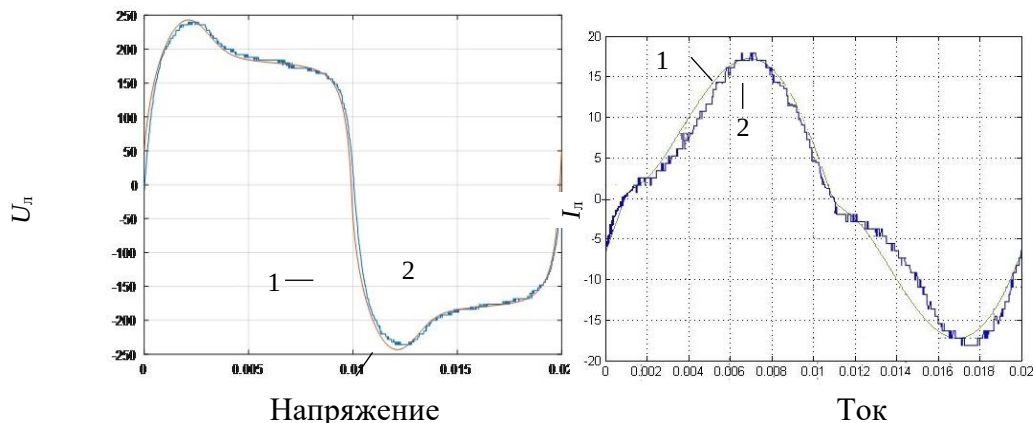


Рисунок 1 – Сравнение расчетных (1) и экспериментальных (2) осциллограмм

Модель проводимости получена в результате анализа фазового портрета лампы, построенного в координатах напряжение – ток (рисунок 2).

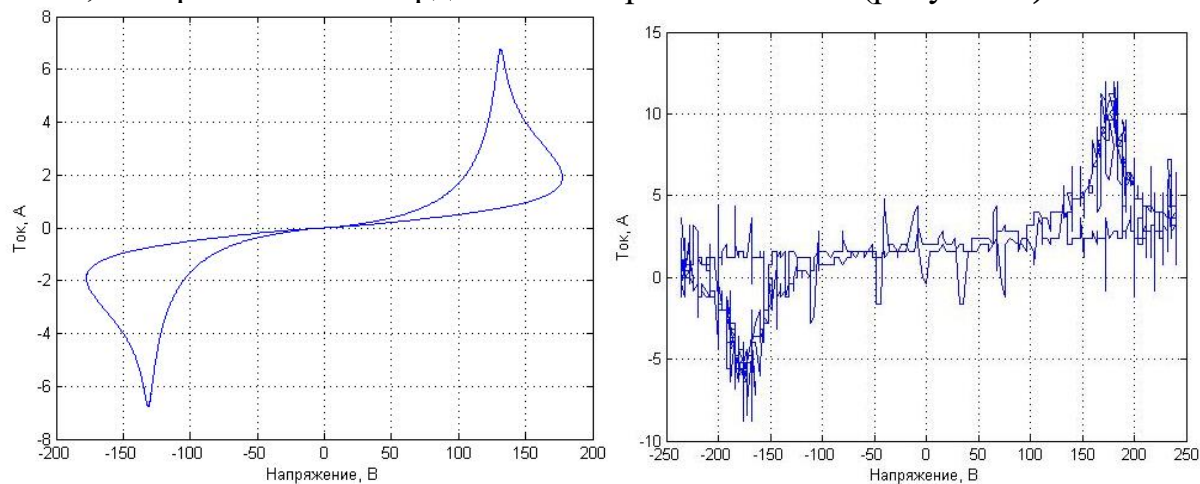


Рисунок 2 – Фазовый портрет лампы, полученный по параметрам математической модели экспериментально

На рисунке 3 показана зависимость проводимости от тока лампы, построенная по расчётным и экспериментальным данным.

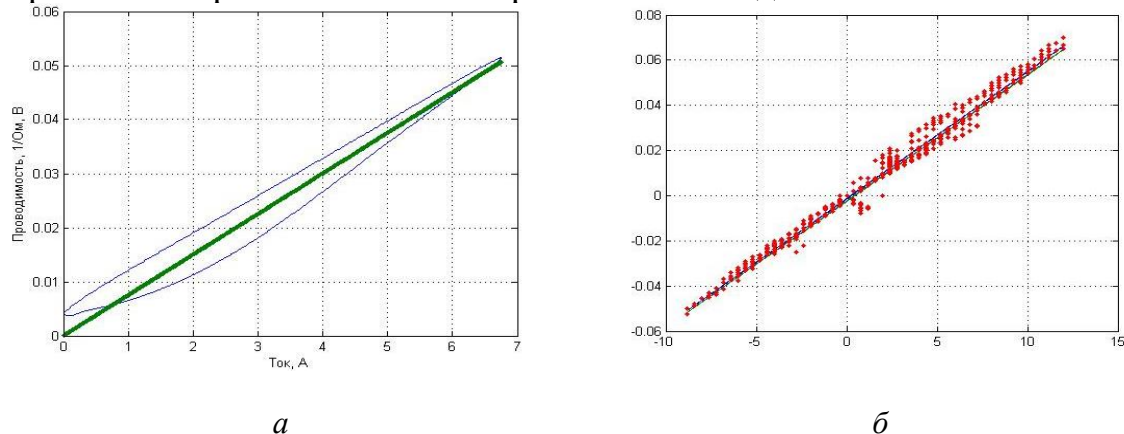


Рисунок 3– Зависимость проводимости от тока:
а – математическая модель; б – экспериментальные данные

Проведена линейная аппроксимация зависимости проводимости от тока, что позволило охарактеризовать модель проводимости следующими параметрами: падением напряжения на лампе U_l , током лампы I_l , проводимостью лампы G_l , коэффициентами линейной аппроксимации kib , среднеквадратичным отклонением аппроксимации s_{ko} .

В таблице 1 приведены параметры модели проводимости для лампы ДНаТ 400Вт Е40.

Таблица 1 – Параметры модели проводимости

Коэффициент	U_l	I_l	k	b	s_{ko}
Ед. изм.	В	А	См	См	См
Значение	146	4	0,0266	0,0070	–0,0211

Рассмотрим математическую модель натриевой лампы, представленную в виде коэффициентов разложения ее функции веса в базисе Уолша $\Phi^T(t)$

$$x(t) = \Phi^T(t)C^x, \quad y(t) = \Phi^T(t)C^y, \quad \omega(\tau) = \Phi^T(\tau)a. \quad (2)$$

Подставляя (2) в уравнение свертки, связывающей вышеуказанные переменные лампы, получим интегральное уравнение для вычисления коэффициентов разложения функции веса a :

$$\Phi^T(t)C^y = \int_0^t \Phi^T(t-\tau)a\Phi^T(\tau)C^x d\tau. \quad (3)$$

Коэффициенты разложения функции веса лампы ДНаТ 400Вт Е40 по базису Уолша занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Параметры модели матричных операторов (коэффициенты разложения функции веса лампы)

Коэффициент	a_1		a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Значение	0,1692		0,1737	0,2209	0,3113	0,9492	2,0272	4,5347	10,3094

Модель, основанная на искусственных нейронных сетях, представлена многомерной двухслойной динамической нейронной сетью прямой передачи с линейными функциями активации. Обучение осуществлялось по алгоритму обратного распространения ошибки с использованием метода Левенберга – Марквардта. Ошибка обучения такой сети (рисунок 9) практически равна нулю.

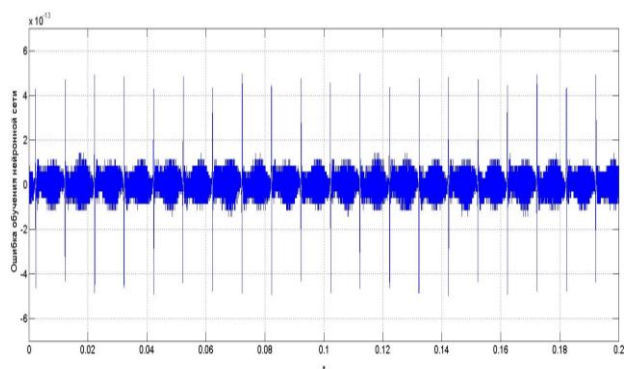


Рисунок 4 – Ошибка обучения нейронной сети

Нейросетевая модель представлена 18 параметрами (синаптическими коэффициентами), занесенными в таблицу 3.

Таблица 3 – Синаптические коэффициенты динамической нейронной сети

Слои	Синаптические коэффициенты						Смещение
1-й нейрон 1-го слоя	0,1766	1,6867	0,0735	–0,3327	0,0716	0,3149	–0,0740
2-й нейрон 1-го слоя	–0,1726	1,8399	–0,0719	0,3252	–0,0699	–0,3077	0,7870
1-й нейрон 2-го слоя	0,7162			0,7329			0,3909

Анализ ошибок моделирования показывает, что минимальную ошибку обеспечивает нейронная сеть, которая характеризуется 17 синаптическими коэффициентами. Наибольшую ошибку демонстрирует модель матричных операторов при использовании 8 коэффициентов разложения. Оптимальной по критериям размерность – точность представляется модель проводимости, характеризующаяся 5 параметрами.

В третьей главе осуществлена разработка алгоритмов контроля и испытаний электрических параметров газоразрядных ламп. Рассмотрены основные виды контроля качества на производстве, а также особенности контроля натриевых ламп высокого давления. В результате рассмотрения для повышения достоверности контроля предложено дополнительно воспользоваться статистическими методами анализа временных рядов, генерируемых системой контроля. В качестве таких рядов необходимо использовать параметры математических моделей, представленных во второй главе.

Выбор математической модели для контроля основывался на точности отображения параметров имитационных моделей в параметры модели, построенной на основе дифференциальных уравнений, поскольку последняя характеризует физику процессов, протекающих в лампе. Отображение осуществлялось статической нейронной сетью.

Исходная задача выбора модели формулируется так.

Дана математическая модель динамической нелинейной системы (1), представленная в виде

$$F(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}) = 0, \quad (4)$$

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.

На математической модели (4) варьированием параметров $\boldsymbol{\theta}$ проводится эксперимент (например, полнофакторный эксперимент 2^N , где N – размерность вектора $\boldsymbol{\theta}$), формируется выборка параметров модели $\boldsymbol{\theta}$ и обучающая выборка переменных для построения имитационных моделей с массивом входов $\mathbf{P}_d$ и массивом выходов $\mathbf{T}_d$

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

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

На выборке $\mathbf{P}_d$, $\mathbf{T}_d$ осуществляется построение имитационной модели и формируется матрица ее параметров $\mathbf{W}_d$. Матрицы параметров представлены таблицами 1 – 3.

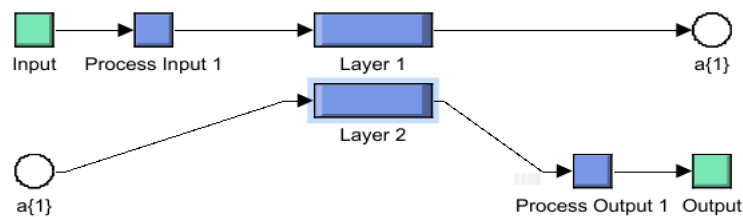
Формируется новая обучающая выборка для обучения статической нейронной сети (радиальной базисной сети или многослойной сети прямой передачи), отображающей матрицу параметров $\mathbf{W}_d$ в вектор параметров $\boldsymbol{\theta}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_c &= \mathbf{W}_d; \\ \mathbf{T}_c &= \boldsymbol{\theta}, \end{aligned} \quad (6)$$

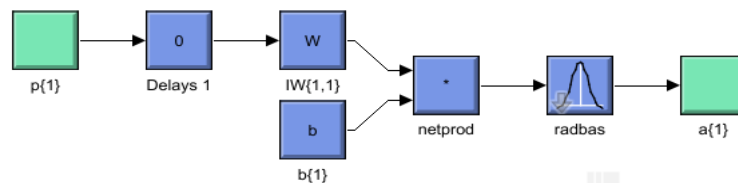
где $\boldsymbol{\theta}$ – массив параметров модели (4), полученный в результате спланированного эксперимента.

Проводится обучение статической сети и вычисляется оценка вектора параметров $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ исходной модели (4).

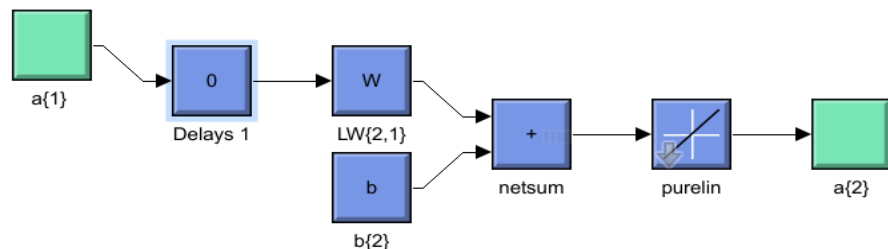
Для обучения были выбраны трехслойная сеть прямой передачи с линейными функциями активации и радиальная базисная сеть с нулевой ошибкой. Более точное отображение моделей показала трехслойная сеть прямой передачи (рисунок 5). Ошибки вычисления параметров трёхслойной сети представлены на рисунке 6.



а) Структура радиальной базисной сети



б) структура первого слоя



г) структура второго слоя.

Рисунок 5 - Радиальная базисная сеть с нулевой ошибкой.

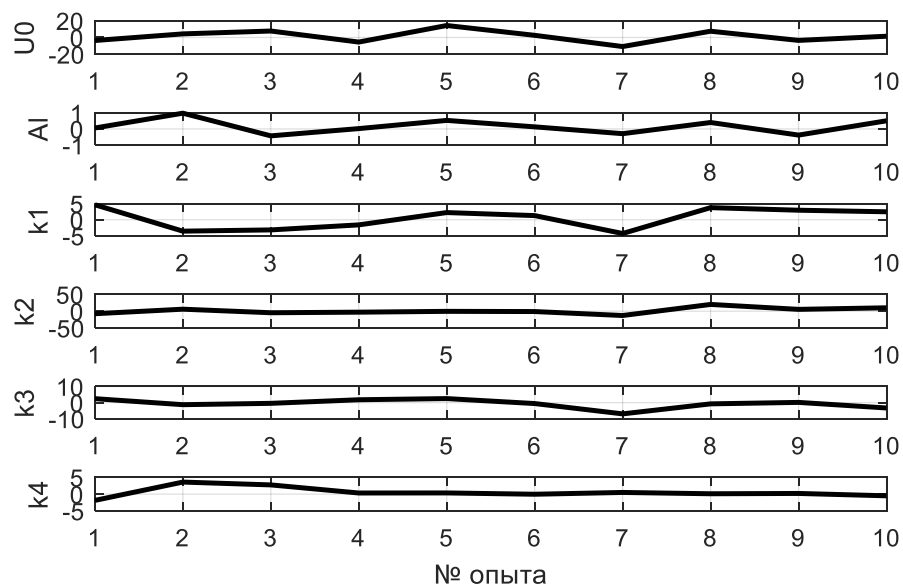


Рисунок 6 - Ошибки вычисления параметров модели (1) с помощью трехслойной сети прямой передачи

Сравнение моделей проводится по максимальной относительной ошибке моделирования:

$$em = \sup(\theta - \hat{\theta}). \quad (7)$$

Максимальные ошибки вычисления параметров аналитических моделей представлены в таблице 4.

Таблица 4 –Максимальные ошибки вычисления параметров аналитических моделей

Модель проводимости, %	Модель матричных операторов, %	Нейросетевая модель, %
9,2	12,3	11,2

Данные таблицы 4 позволяют остановиться на модели проводимости натриевой лампы высокого давления.

Было проведено тестирование модели проводимости при проведении допускового контроля на совпадение результатов контроля по каждому параметру модели. Для этого в исходной модели (1) 150 раз проводилось случайное изменение её параметров пределах 20 % от их номинальных значений, после этого рассчитывались параметры модели проводимости и затем осуществлялся их допусковый контроль в диапазоне 3σ .

В большинстве случаев наблюдалось полное совпадение результатов контроля по всем параметрам модели проводимости. В 9 случаях наблюдалась «ложная тревога» и 9 случаях «пропуск цели» по параметру s_{ko} модели проводимости. По результатам тестирования было предложено осуществлять контроль лампы по падению на ней напряжения, поскольку остальные параметры дают совпадающие результаты контроля.

Для повышения достоверности контроля были предложены и разработаны следующие алгоритмы контроля годности готовой продукции, построенные на основе анализа временных рядов, генерируемых системой контроля.

1. Алгоритм сглаживания регистрируемых данных напряжения и тока лампы. За основу взят алгоритм медианной фильтрации (рисунок 7).

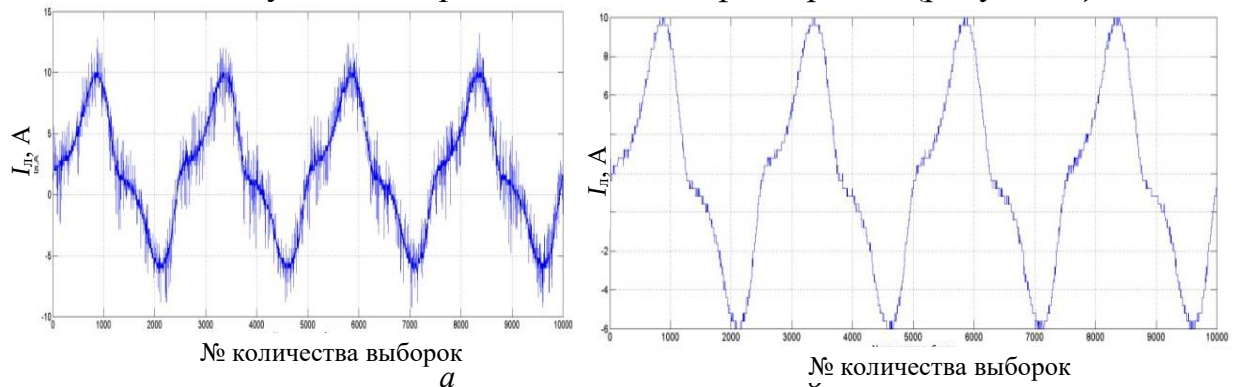


Рисунок 7 – Осциллограммы тока лампы:
а – исходная; б – после фильтрации

2. Алгоритм оперативного контроля на основе статистической модели временных рядов, генерируемых системой контроля:

- измерение падения напряжения на лампах;
- формирование выборок двух числовых рядов из измеренных падений напряжения. Объём выборки равен числу ($n=30$) контролируемых ламп, установленных в систему контроля;
- допусковый контроль;
- проверка статистической гипотезы о статистическом соответствии двух контролируемых временных рядов по непараметрическому критерию Уилкоксона;
- принятие решения о годности изделия, когда результаты допускового контроля и результаты теста Уилкоксона положительны.

3. Алгоритм долговременного контроля путем выделения трендовой, периодической и случайной составляющих временных рядов, формируемых станцией архивирования. Алгоритм основан на сингулярном разложении временных рядов и включает следующие этапы (рисунок 8):

- чтение файла и архива
- формирование временного ряда;
- разбиение временного ряда на участки равной длины;
- определение длины вложения, равное длине заданного участка;
- формирование траекторной матрицы из временного ряда:

$$X = \begin{pmatrix} f_0 f_1 f_2 \dots f_{K-1} \\ f_1 f_2 f_3 \dots f_K \\ f_2 f_3 f_4 \dots f_{K+1} \\ \vdots \\ f_{M-1} f_M f_{M+1} \dots f_{N-1} \end{pmatrix}$$

- проведение сингулярного разложения траекторной матрицы;
- выделение тренда;
- выделение периодической составляющей;

– выделение случайной составляющей.

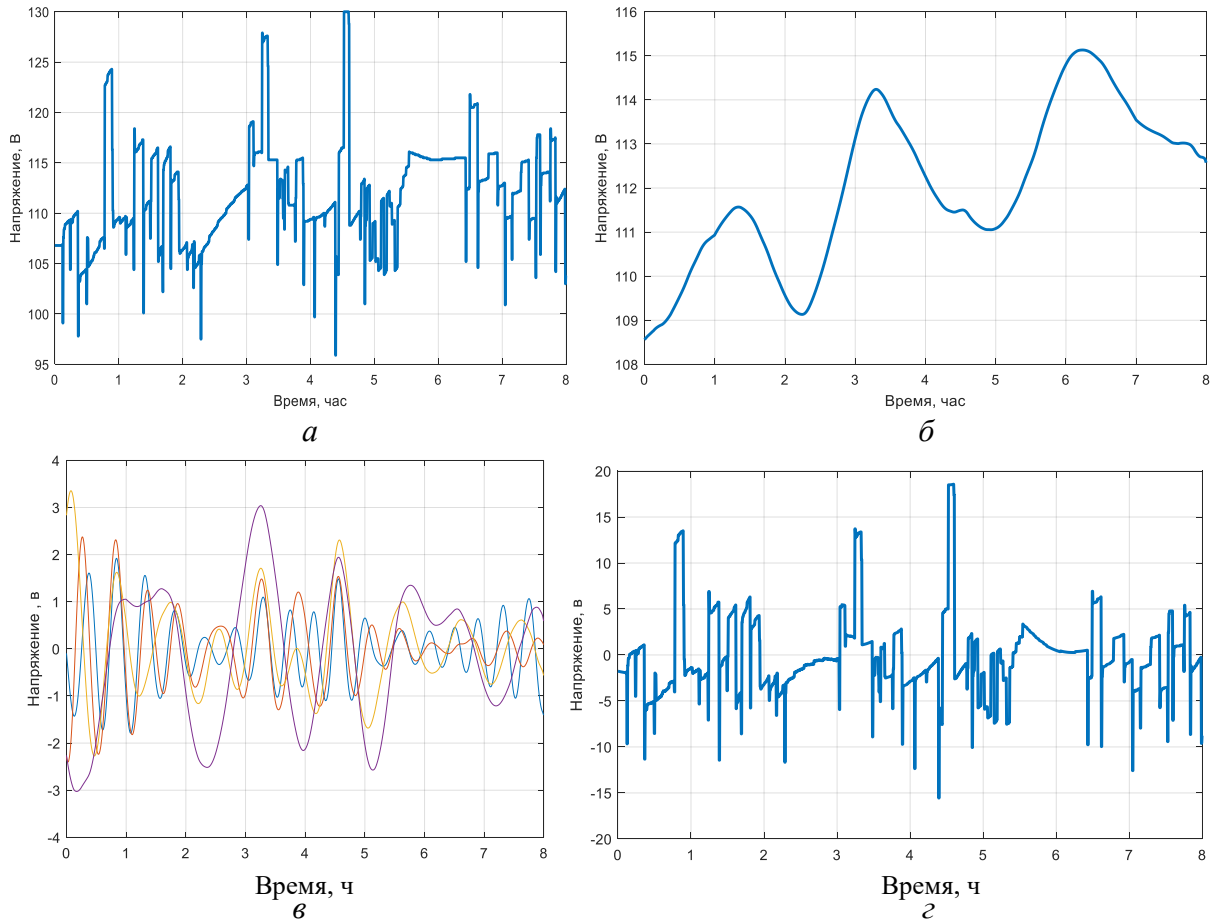


Рисунок 8–Графики исходной(а), трендовой (б), периодической (в), случайной (г)составляющих

4. Алгоритм построения модели случайной составляющей временного ряда. Алгоритм основан на рекуррентном оценивании параметров формирующего фильтра, генерирующего данный временной ряд:

– задаются начальные значения вектора оценок параметров модели и вектора данных:

$$\hat{\theta}(0) = 0; \mathbf{P}(0) = \alpha \mathbf{I}; \quad (8)$$

Производятся измерения выходного сигналов объекта, и формируется исходный вектор данных $\Psi(k)$.

Вычисляется текущее значение входного сигнала

$$\hat{v}(k) = y(k) - \Psi^T(k)\theta(k-1); \quad (9)$$

Формируется новый вектор данных

$$\Psi^T(k+1) = [-y(k), \dots, -y(k-n), \hat{v}(k), \dots, \hat{v}(k-m)]; \quad (10)$$

Вычисляется вектор коррекции

$$\gamma(k) = \frac{\mathbf{P}(k)\Psi(k+1)}{\Psi^T(k+1)\mathbf{P}(k)\Psi(k+1) + 1}; \quad (11)$$

Находится новая оценка параметров модели

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + \gamma(k)[y(k+1) - \Psi^T(k+1)\hat{\theta}(k)]; \quad (12)$$

Вычисляется новый вектор данных

$$\mathbf{P}(k+1) = [\mathbf{I} - \gamma(k)\Psi^T(k+1)]\mathbf{P}(k); \quad (13)$$

Далее процесс вычислений повторяется.

На рисунке 9 представлены корреляционная функция и гистограмма случайной составляющей, которые свидетельствуют о применимости рекуррентного метода наименьших квадратов.

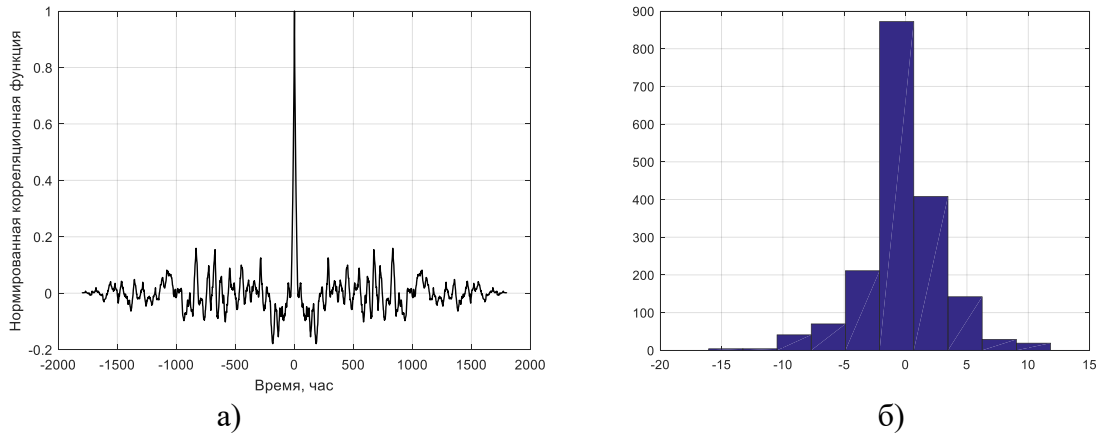


Рисунок 9 – Корреляционная функция (а) и гистограмма случайного сигнала.

На рисунке 10 показаны коэффициенты рассчитанного вектора параметров (коэффициенты АРСС-модели) и переходная характеристика модели

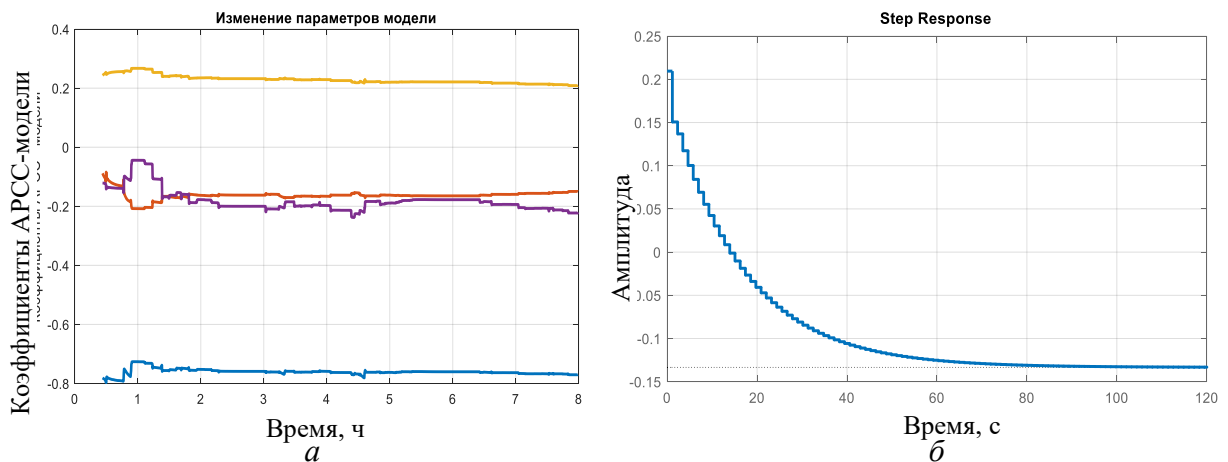


Рисунок 10– Коэффициенты АРСС-модели (а) и переходная характеристика (б)

Передаточная функция формирующегося фильтра с дискретным временем: 1 с:

$$W_{od} = \frac{0,2095z^2 - 0,2201z}{z^2 - 0,77z - 0,1502}. \quad (14)$$

В четвертой главе рассмотрен инжиниринг системы контроля натриевых ламп высокого давления, функциональная схема которого приведена на рисунке 11.



Рисунок 11 – Функциональная схема системы контроля натриевых ламп

На рисунке 12 показан внешний вид шкафа управления.

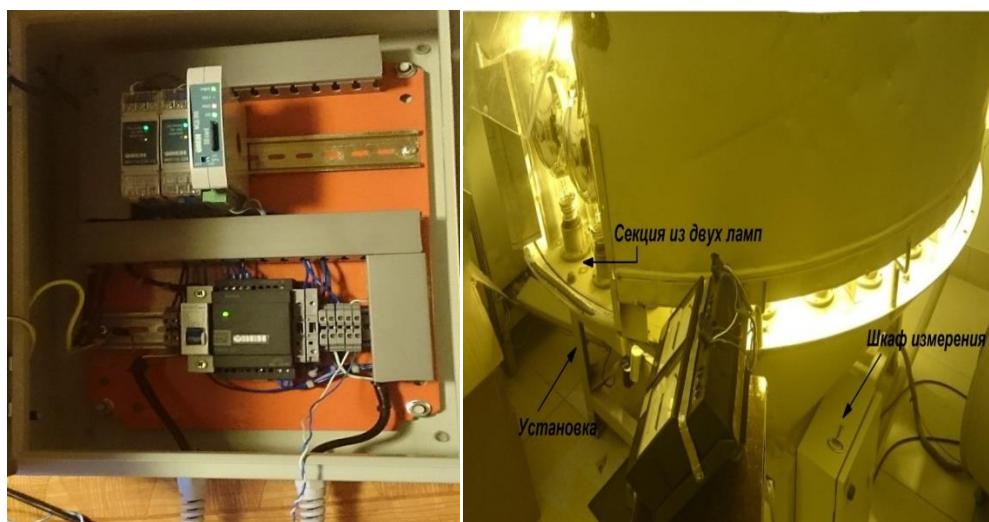


Рисунок 12 – Внешний вид шкафа управления и технологической установки

Экранные формы пользовательского интерфейса показаны на рисунке 13.

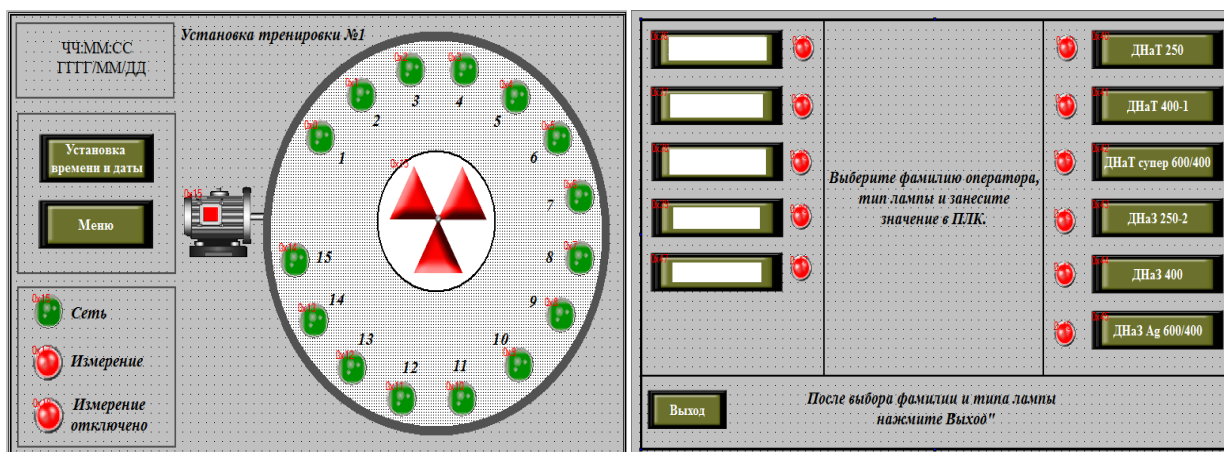


Рисунок 13 – Экранные формы пользовательского интерфейса

Разработаны программы для отечественных промышленных контроллеров ОВЕН в среде программирования CoDeSys. Разработаны электрические принципиальные схемы, отображающие монтаж внутришкафных соединений дискретных модулей, входов и выходов.

Для повышения достоверности контроля использовались разработанные в п. 3 алгоритмы обработки контролируемых переменных. Данные о технологическом процессе отображаются на панели оператора.

Осуществлена сравнительная оценка работы функциональных подсистем до внедрения разработанных систем контроля и после. Результаты оценок приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Оценка эффективности АСУТП производства

Наименование параметра	До внедрения	После внедрения
Время контроля	180 мин	120 мин
Некондиционная продукция (за смену)	30	20
Ошибки оператора за смену	5	1

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ методов контроля и испытаний электрических параметров газоразрядных натриевых ламп высокого давления, установлена необходимость повышения достоверности контроля путем обоснованного выбора контролируемых параметров.

2. Разработаны четыре аналитические модели натриевой лампы на основе дифференциальных уравнений, модели проводимости, метода матричных операторов, нейросетевых методов, параметры которых предложено использовать в качестве контролируемых.

3. Проведены вычислительные эксперименты на полученных моделях, отражающих процессы, происходящие в натриевой лампе, и установлены следующие ошибки моделирования: модель проводимости – 5%, модель матричных операторов – 3%, нейросетевая модель – нулевая ошибка.

4. Разработан алгоритм параметрической идентификации нелинейной аналитической модели НЛВД с использованием статических нейронных сетей, отображающих параметры имитационных моделей в параметрах исходной аналитической модели. Были определены следующие ошибки: идентификации модели проводимости – 9,2 %, модели матричных операторов – 12,3%, нейросетевой модели – 11,2 %.

5. Применен многомерный многоальтернативный алгоритм контроля параметров натриевых ламп высокого давления, заключающийся в анализе временных рядов, генерируемых системой контроля и включающий в себя алгоритмы оперативного контроля с использованием оперативных трендов и долгосрочного контроля с использованием исторических трендов.

6. Оперативный контроль основан на построении статистических моделей временных рядов с использованием теории оценок, проверки статистических гипотез с последующим принятием решения о годности продукции по мажоритарному принципу сравнения полученных оценок.

7. Долговременный контроль основан на сингулярном разложении временных рядов с последующим выделением трендовой, периодической и случайной составляющих.

8. Разработана и внедрена в производство автоматизированная система контроля качества натриевых ламп, позволяющая отслеживать состояние параметров технологического процесса и производить их архивирование для дальнейшей обработки и анализа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Мальцев Е.Г. Исследование импульсного питания разрядных ламп низкого давления / Е.Г. Мальцев, А.В. Волков // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2014. – № 2. – С. 165–168.

2. Микаева С.А. Математическая модель излучения разрядной лампы низкого давления / С.А. Микаева, А.С. Микаева, Е.Г. Мальцев, А.В. Волков // Автоматизация и соврем. технологии. – 2014. – № 7. – С. 27–30.

3. Семенов А.Д. Экспериментальная апробация математической модели натриевых ламп высокого давления / А.Д. Семенов, А.В. Волков // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2018. – №1. – С. 136–139.

4. Волков А.В. Применение математических методов для реализации алгоритмов контроля качества натриевых ламп / А.В. Волков // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2018. – № 8. – С. 65–68.

Публикации в изданиях, входящих в перечень SCOPUS

1. Semenov A.D. Quality control of sodium high-pressure lamps by the singular decomposition method [Электронный ресурс] / A.D. Semenov, A. V. Volkov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – 2019. – P. 1–4. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602531/> (дата обращения: 14/04/2019).

Свидетельства о государственной регистрации программ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016661276, Российская Федерация. AVDControlQt [Текст] / Устин А.М., Волков А.В.; заявитель и правообладатель Устин А.М. (RU). – № 2016661276; заявл. 08.08.2016г.; опубли. 20.11.2016 г.

2. Волков А.В., Троянский А.В. Государственная регистрация программы для ЭВМ: «Программа для управления системой контроля качества натриевых ламп высокого давления». Номер регистрации (свидетельства) 2018615222; дата регистрации 03.05.2018г.; номер и дата поступления заявки 2017661485 30.10.2017 г.; дата публикации 03.05.2018 г.

3. Волков А.В., Троянский А.В., Семенов А.Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для обработки архивных файлов в системе контроля качества натриевых ламп высокого давления». Номер регистрации (свидетельства) 2018661415; дата регистрации 07.09.2018г.; номер и дата поступления заявки 2018618487 07.08.2018 г.; дата публикации 07.09.2018 г.

Публикации в других изданиях

1. Волков А.В. Преобразователь трехфазного переменного напряжения в постоянное на однофазном магнитопроводе / А.В. Волков, Ю.С. Игольников // Современная техника и технологии :сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ-2010. – Томск, 2010. – С. 179–180.

2. Волков А.В. Моделирование алгоритма управления преобразователем частоты и реализация структуры управления на базе контроллеров семейства STM32[Электрон. ресурс]/ А.В. Волков, О.Ю. Герман, Д.В. Байков // Электроника и информ. технологии. – 2012. –Вып. 1(12).– Режим доступа : http://fetmag.mrsu.ru/2012-1/pdf/Simulation_Algorithm.pdf.

3. Шишов О.В. Повышение энергоэффективности системы вентиляции и обогрева воздухоопорных сооружений / О.В. Шишов, А.В. Волков // Современная техника и технологии :сб. тр. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 9–13 апр. 2012 г. – Томск, 2012. – С. 33–34.

4. Волков А.В. Моделирование алгоритма управления преобразователем частоты и реализация структуры управления на базе контроллеров семейства STM32 /А.В. Волков, О.Ю. Герман, Д.В. Байков // Stredoevropsky VestnikproVedu a Vyzkum. – 2012. – Т. 80. – С. 140–149.

5. Волков А.В. Расчет преобразователя частоты со звеном постоянного тока для электропривода / А.В. Волков, О.Ю. Герман, В.Е. Майоров // Материалы за X Международной научна практична конференция «Найновите научны постижения – 2014». Т. 33. Технологии. – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2014. – С. 40–47.

6. Исследование теплового состояния обмотки асинхронного двигателя при управлении частотным преобразователем с ШИМ / А.В. Волков, Е.И. ИONOва, М.А. Бобров, А.Д. Калинин // XLV Огарёвские чтения: материалы науч. конф. : в 3 ч. / отв. за вып. П.В. Сенин. – Саранск, 2017. – Ч. 3. – С. 88–95.

7. Волков А.В. Автоматизация системы отбраковки ламп высокого давления / А.В. Волков, А.В. Троянский // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2017. – С. 44–48.

8. Семенов А.Д. Получение архивных данных в системе контроля качества натриевых ламп / А.Д. Семенов, А.В. Волков // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 ч. – Пенза, 2018. – Ч. 2. – С. 249–252.