

АМУЗАДЕ Александр Сергеевич

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СЕЛЬСКИХ
ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ
КОМПАКТНЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП
С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ПУСКРЕГУЛИРУЮЩИМИ
АППАРАТАМИ**

**Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и
электрооборудование в сельском хозяйстве**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2004

Диссертация выполнена в Красноярском государственном техническом университете

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
Пантелеев Василий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Ловчиков Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
Кунгс Ян Александрович

Ведущая организация ГНУ «НИИ автоматике и
электромеханики при Томском
государственном университете систем
управления и радиоэлектроники»

Защита состоится «28» мая 2004 г. в 10⁰⁰ часов на заседании регионального диссертационного совета КМ 220.037.01 при Красноярском государственном аграрном университете по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 88.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного аграрного университета.

Автореферат разослан «27» апреля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бастрон А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Существующие на сегодняшний день сельские электрические сети не удовлетворяют требованиям качества электроэнергии в связи с ростом электропотребления и плохим техническим состоянием сельских электрических сетей. Питаемые таким напряжением источники света либо не обеспечивают требуемой нормируемой освещенности (источники света с лампами накаливания), либо вообще не зажигаются при значительном снижении напряжения питания (газоразрядные источники света). Это особенно проявляется для мелких автономных объектов: жилища чабанов, отдельные жилые дома или группы из двух-трех домов, в которых проживает персонал, обслуживающий отдаленные животноводческие фермы, бригадные полевые станы и дома бригад, передвижные домики для рабочих. Обычно электропитание таких объектов производится от малоэкономичных автономных бензиновых и дизельных электростанций малой мощности, имеющих нестабильное выходное напряжение. Кроме того, существует объективная необходимость обеспечения птицеводческих и животноводческих комплексов наиболее экономичными источниками света.

Одним из способов экономии электроэнергии в сельском хозяйстве является организация управления освещением и его автоматизация для высокоэкономичных источников света со стабилизацией статического режима их работы. Экономичными источниками света являются газоразрядные лампы, в частности, трубчатые люминесцентные лампы (ЛЛ). Они находят широкое применение для освещения:

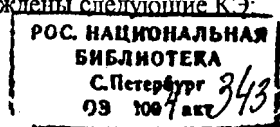
- жилых домов для персонала и административных зданий;
- производственно-технологических помещений.

Компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) - это новый класс высокоэффективных источников света массового применения. Они находят применение в тех же областях, что и трубчатые люминесцентные лампы. К их особенностям относятся повышенная световая отдача (до 90..110 лм/Вт), малые габариты и вес.

Для зажигания и ограничения тока ЛЛ необходим пускорегулирующий аппарат (ПРА). Источник света является совокупностью применяемых типов КЛЛ и ПРА (или комплектом КЛЛ-ПРА). Законы регулирования используемого ПРА определяют эффективность каждого конкретного источника света с КЛЛ.

В соответствии с директивой ЕС № 2000/55/EG, начиная с 2000 г. источники света (ИС), предназначенные в основном для применения в жилых помещениях, мощностью более 4 Вт и со световым потоком не выше 6500 лм должны иметь на упаковке обозначение одного из четырех классов энергоэкономичности (КЭ). Характеристикой класса КЭ является диапазон величины световой отдачи ламп (η , лм/Вт). На этикетке стандартизированной формы, отпечатанной на упаковке, указан тип КЭ, к которому относится данный тип ИС.

Для пускорегулирующих аппаратов ЛЛ утверждены следующие КЭ:



- 1) класс А (трубчатые ЛЛ с повышенной $\eta > 90$ лм/Вт, КЛЛ со встроенным электронным ПРА и цоколем E27);
- 2) класс В (КЛЛ с $\eta \leq 60$ лм/Вт);
- 3) класс С (ЛЛ со стандартными типами электромагнитных ПРА),
- 4) класс D (ЛЛ с электромагнитными ПРА с максимальными потерями).

Той же директивой, с целью вытеснения с рынка ЕС низкоэффективных электромагнитных ПРА и ускорения широкого внедрения электронных ПРА, предписан запрет на продажу и применение:

- 1) с 21 мая 2002 г. - ПРА класса D;
- 2) с 21 ноября 2005 г. - ПРА класса С.

В России в основном эксплуатируются и производятся ПРА класса D. Следовательно, для производства конкурентоспособной продукции нужно освоить производство электронных ПРА для КЭ А и В.

Наиболее перспективны электронные ПРА КЭ А, поскольку только электронный ПРА позволит использовать все технические преимущества нового класса люминесцентных ламп. Большинство российских ПРА построено на основе зарубежной электроники, и лишь немногие - на основе отечественной электроники. Однако эти ПРА не являются высококачественными, так как их схемотехника максимально упрощена и удешевлена за счет снижения эксплуатационного срока службы ЛЛ. Такая ситуация объясняется тем, что разработчики учитывают низкий уровень российских цен на электроэнергию (относительно мировых). Цены на электроэнергию, в свою очередь, определяют срок окупаемости и максимальную стоимость комплектующих для ПРА. Ситуация осложняется тем, что цены на КЛЛ значительно выше цен на трубчатые ЛЛ. Поэтому для эффективного применения высокоэкономичных КЛЛ для класса энергоэкономичности А в условиях России необходима разработка новейших электронных ПРА для КЛЛ на уровне мировых стандартов. Вместе с тем электронный ПРА для КЛЛ должен быть экономически выгодным в сферах его производства и потребления. Экономически выгодный в условиях России ПРА будет заведомо выгодным в странах с более высоким уровнем цен на электроэнергию.

Решением этой проблемы является разработка и применение новых законов регулирования КЛЛ, позволяющих удешевить схемотехнические решения новейших электронных ПРА при увеличении функциональных возможностей и улучшении технических характеристик комплекта ПРА-люминесцентная лампа

Целью работы является создание энергоэффективных законов регулирования компактных люминесцентными лампами и схем управления электронными пускорегулирующими аппаратами, улучшающих технико-экономические показатели люминесцентных источников света до классов энергоэкономичности А и В.

Объектом исследования являются источники света с компактными люминесцентными лампами, предназначенные для работы в условиях сельских электрических сетей и соответствующие классам энергоэкономичности Л и В

Предметом исследования является комплект ПРЛ-КЛЛ, реализующий энергоэффективные законы регулирования при значительных колебаниях напряжения питающей сети, конкурентоспособный на мировом рынке светотехнической продукции по своим энергетическим и стоимостным характеристикам.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие математические модели и разработать модель КЛЛ, позволяющую учитывать ее основные эксплуатационные параметры и решать задачу их оптимизации в составе комплекта ПРА - КЛЛ.

2. Сформулировать математически задачу оптимизации комплекта ПРА - КЛЛ, включая разработку математической модели объекта оптимизации, обоснование критерия и выбор метода оптимизации, формирование ограничений на управляющие воздействия

3. Синтезировать оптимальные законы регулирования КЛЛ.

4. Синтезировать схему управления электронным балластом, основанную на новых эффективных законах регулирования.

5. Исследовать экспериментально разработанные схемы управления

Методы исследования:

Для представления модели объекта исследования и его оптимизации использовались методы теоретической кибернетики, методы оптимизации, основанные на последовательном анализе вариантов.

Оценка эффективности разработанных алгоритмов осуществлялась методами имитационного и статистического моделирования.

При разработке специального программного обеспечения использовались принципы структурного программирования.

Научную новизну работы составляют:

1. Математическая модель компактной люминесцентной лампы, основанная на дифференциальной аппроксимации вольт-амперных характеристик, учитывающая ее основные эксплуатационные параметры и позволяющая решать задачу их оптимизации в составе комплекта ПРА - КЛЛ

2. Математическая формулировка и решение задачи оптимизации комплекта ПРА - КЛЛ по критерию максимальной световой отдачи, позволяющие синтезировать энергоэффективные законы регулирования.

3. Энергоэффективные законы регулирования ПРА для КЛЛ.

4. Схема и алгоритм управления инвертирующим активным корректором коэффициента мощности схемы ПРА-КЛЛ.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель КЛЛ, связывающая её электрические и эксплуатационные параметры в статическом режиме работы лампы, являющаяся развитием известной модели вольт-амперных характеристик Крайнопольского А.Е.

2. Методика анализа полезного срока службы КЛЛ, позволяющая в короткий срок (4-6 ч) определить значение расчетного срока службы лампы.

3. Математическая формулировка и решение задачи оптимизации комплекта ПРА - КЛЛ по выбранному критерию максимальной световой отдачи, позволяющие синтезировать энергоэффективные законы регулирования.

4. Энергоэффективные законы регулирования ПРА для КЛЛ.

5. Схема и алгоритм управления инвертирующим активным корректором коэффициента мощности (АККМ) схемы ПРА-КЛЛ.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

Методика анализа полезного срока службы КЛЛ, позволяющая провести кратковременное сравнительное экспериментальное исследование различных типов ПРА по продолжительности срока службы люминесцентной лампы при работе в комплекте с данным ПРА.

Схема экспериментального стенда, позволяющего идентифицировать значения параметров математической модели КЛЛ и определить значение полезного срока службы лампы по соответствующей методике.

Методика расчета статического режима АККМ, позволяющая выбрать номиналы элементов для корректора коэффициента мощности на требуемую нагрузку.

Разработанная схема электронного ПРА для КЛЛ 36 Вт класса энергоэкономичности А, предназначенная для бытового и производственного освещения в сельском хозяйстве.

Материалы работы использованы в техническом задании на высокочастотный ПРА для компактных люминесцентных ламп (ВЧ ПРА КЛЛ).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на Всероссийских и региональных конференциях:

- на третьей научно-практической конференции 2002. «Современные средства и системы автоматизации - гарантия высокой эффективности производства». (г. Томск).
- • на IV Всероссийской научно-практической конференции 2003. «Проблемы и перспективы энергообеспечения города». (г. Красноярск).
- на международной научно-технической конференции ЭЭЭ-2003. «Пути и технологии экономии и повышения эффективности использования энергетических ресурсов региона». (г. Комсомольск-на-Амуре).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 9 работ в центральной и региональной печати, на конференциях и семинарах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения; объем

диссертации 142 стр., в том числе 124 стр. основного текста, включая 46 рисунков, 12 таблиц, список литературы состоит из 107 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, диссертации и сформулированы цели и задачи исследований.

В первой главе проводится анализ физических процессов в люминесцентных лампах с дуговым разрядом низкого давления в парах ртути.

Далее анализируются схемы электронных ПРА (рисунок 1), их достоинства и недостатки.

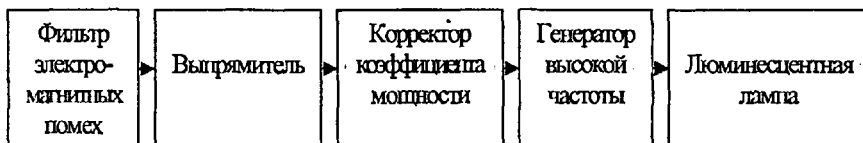


Рисунок 1 - Структурная схема электронного балласта

Рассматриваются функциональные возможности отечественных и зарубежных специализированных микросхем для активных корректоров коэффициента мощности и выходных высокочастотных генераторов для КЛЛ.

Проводится формализация и анализ задач исследования. Анализ задач исследования основывается на использовании основных параметров ламп:

1. Световые: цвет и спектральный состав света, световой поток Φ , лм, пульсации светового потока;
2. Электрические: мощность P_n , Вт, ток I_n , А, д питающего тока, тип плазменного разряда;
3. Эксплуатационные: световая отдача η , лм/Вт, срок службы $T_{ср}$, ч, зависимость световых и электрических параметров от напряжения питания $U_{пит}$, В и условий внешней среды.

В результате формализации основная задача исследования КЛЛ сводится к определению взаимосвязей между управляющими, возмущающими и управляемыми параметрами (рисунок 2).

Приводится обоснование технико-экономического сравнения электронного ПРА с электромагнитным ПРА. Также намечаются пути снижения электропотребления комплектом ВЧ ПРА-КЛЛ за счет возбуждения лампы пачками импульсов или использования принципа возбуждения безэлектродных ЛЛ.

Во второй главе проводится обзор и анализ существующих математических моделей, выбирается модель, наиболее полно отвечающая требованиям использования в задачах оптимизации:

- 1) высокая точность соответствия экспериментальным данным ламп;
- 2) сравнительная простота определения расчетных параметров модели по экспериментальным данным для конкретного типа лампы;
- 3) невысокая сложность математической модели.

Производится выбор методики построения модели КЛЛ для задачи оптимизации. Методика основана на структуре взаимосвязей, представленной на рисунке 2. Для идентификации полезного срока службы люминесцентной лампы автором разработана методика аналитического определения по результатам экспериментов (система уравнений (1)).

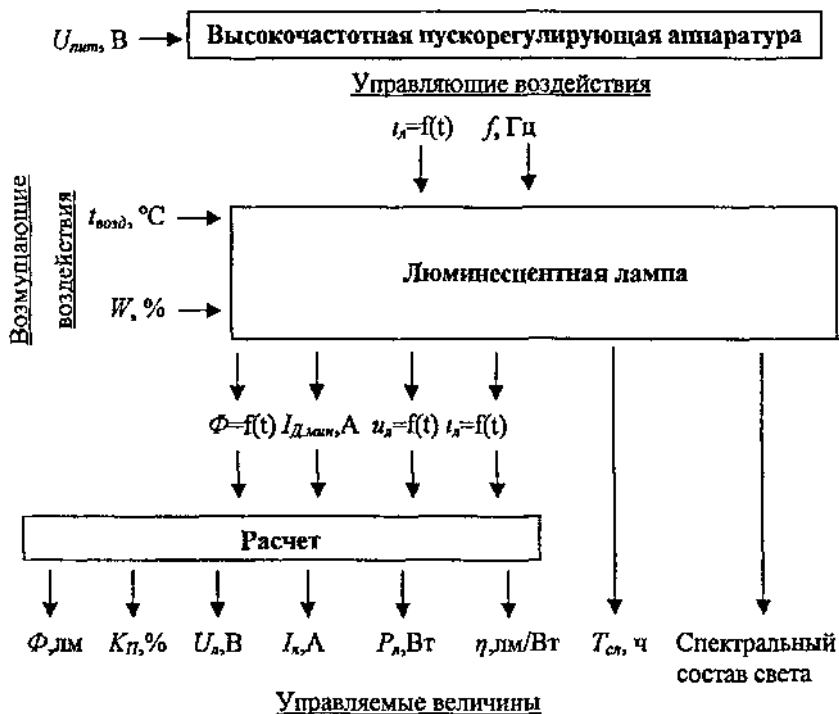


Рисунок 2 - Развернутая модель задачи

Искомыми в системе уравнений (1) являются параметры A , k , t , Φ_t . Постоянные A , k определяют текущий закон снижения светового потока, а Φ_t - значение светового потока, соответствующее текущему сроку эксплуатации лампы t .

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 = \left(1 - \frac{1}{k} \ln(A \cdot k \cdot t + 1) \right) / \Phi_t \\ \frac{\Phi_{t+1}}{\Phi_t} = \left(1 - \frac{1}{k} \ln(A \cdot k \cdot (t + dt) + 1) \right) / \Phi_t \\ \frac{\Phi_{t+2}}{\Phi_t} = \left(1 - \frac{1}{k} \ln(A \cdot k \cdot (t + 2 \cdot dt) + 1) \right) / \Phi_t \\ \frac{\Phi_{t+3}}{\Phi_t} = \left(1 - \frac{1}{k} \ln(A \cdot k \cdot (t + 3 \cdot dt) + 1) \right) / \Phi_t \end{array} \right. \quad (1)$$

Затем, для расчета полезного срока службы используется следующее уравнение:

$$T_{en} = \frac{e^{0,2k} - 1}{A \cdot k} \quad (2)$$

Последовательность операций по вычислению полезного срока службы лампы:

- 1) измерение значений светового потока через интервалы времени (например, 1 час; требуется АЦП 16-20 разрядов);
- 2) составление и решение системы уравнений (1);
- 3) определение полезного срока службы по формуле (2);
- 4) определение погрешностей расчета полезного срока службы (учет ограниченной точности измеренных значений светового потока и разброса параметров ламп).

Для определения экспериментальных характеристик КЛЛ автором разработан стенд, управляемый от персонального компьютера (рисунок 3). В составе стенда имеется не менее одного выходного канала, и не менее 3-х входных каналов. Разрядность выходного канала была принята равной 10 бит, что обусловлено необходимостью устанавливать рабочее напряжение на лампе таким образом, чтобы обеспечить некоторый заданный ток в лампе с высокой точностью. Для большинства входных каналов достаточно размерности 8-9 бит, так как напряжение сети легко аппроксимируется плавной кривой, но канал светового потока требует размерности 16-20 бит.

На основании экспериментальных данных проводится идентификация уравнений модели для оптимизации.

Идентификация выражения среднего светового потока Φ_{cp} КЛЛ была осуществлена с учетом следующих допущений:

1. Среднее значение потока ультрафиолетового излучения атомами ртути в плазме дугового разряда лампы прямо пропорционально среднему значению тока лампы;
2. Среднее значение потока ультрафиолетового излучения плазмой дугового разряда лампы прямо пропорционально длине положительного столба

дугового разряда (напряжению на лампе за вычетом анодно-катодных потерь напряжения);

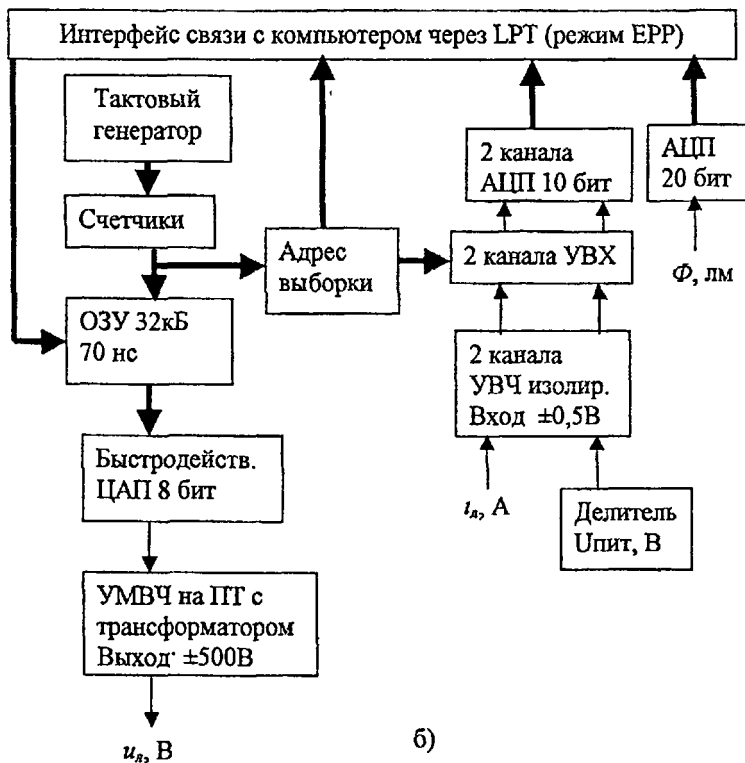
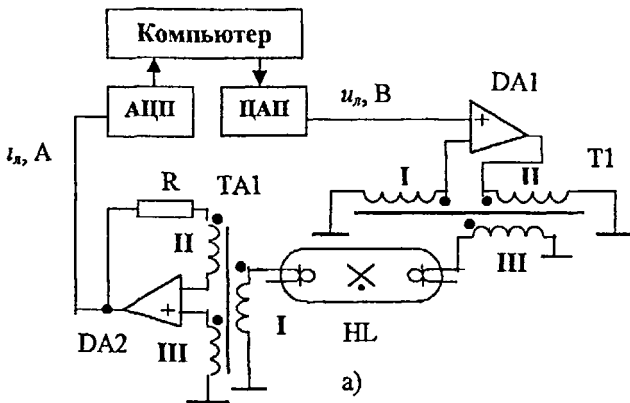


Рисунок 3 – Схема исследовательского стенда:

а) аналоговая часть каналов u_n и I_n ,

б) аналоговая и цифровая части структурной схемы

3. Среднее значение светового потока люминофора лампы пропорционально среднему значению ультрафиолетового излучения дугового разряда лампы;

4. Изменения светового потока от регулирования напряжения лампы и от тока лампы принимаются независимыми друг от друга (то есть при изменении тока и напряжения лампы, изменение светового потока определяется произведением функции светового потока от тока лампы и функции светового потока от напряжения лампы).

Эти допущения позволяют сформулировать следующие положения:

1) преобразование энергии «электрический ток - ... - УФ-излучение» является прямо пропорциональным длине положительного столба дугового разряда лампы ($U_n - dU_{ак}$), В:

$$\Phi_{УФ} \sim (U_n - dU_{ак}) \quad (3)$$

2) преобразование энергии «УФ-излучение - видимое излучение» за счет фотолюминесценции (видимый световой поток Φ_0) в слое люминофора пропорционально среднему току лампы по некоторому закону:

$$\Phi_0 \sim (U_n - dU_{ак}) \cdot f(I_n) \quad (4)$$

При этом функцией $f(I_n)$ учитывается возможная нелинейность преобразования потока УФ-излучения в видимое излучение в слое люминофора.

На основании экспериментальных зависимостей анодно-катодных потерь напряжения от частоты питающего тока было получено аппроксимирующее выражение, связывающее эти потери напряжения $dU_{ак}$ в плазме дугового разряда с частотой питающего тока:

$$dU_{ак} = \frac{11.32}{\lg(f) - 0.875} + 6.255 \quad (5)$$

При идентификации уравнений, описывающих зависимости срока службы от других параметров математической модели учитывалось, что:

1. Оксид бария - самый легкоиспаряющийся элемент из активного материала электродов;

2. Масса оксида бария пропорциональна току термоэмиссии катода во время работы лампы.

Это позволило Припять в качестве гипотезы следующие утверждения:

1) спад светового потока обусловлен испарением с электродов лампы одного из элементов состава активного материала катода - оксида бария (BaO);

2) текущий средний ток лампы прямо пропорционален текущей массе оксида бария.

Так как ВЧ ПРЛ рекомендуется проектировать на частоту тока лампы свыше 20 кГц, а на частоте 5 кГц коэффициент пульсаций светового потока при номинальном токе равен 10 %, что удовлетворяет всем существующим требованиям к коэффициенту пульсации освещенности производственных помещений, то для решения задачи оптимизации не требуется идентификация уравнения мгновенного значения светового потока.

В результате этих допущений дифференциальная модель ВАХ А.Е. Краснопольского (6) была дополнена уравнениями (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dg_{\lambda}}{dt} = g_{\lambda} \cdot M_1(u_{\lambda}) \\ G_{\lambda} = \frac{i_{\lambda}}{u_{\lambda}} = \frac{g_{\lambda}}{1 + K_1 \cdot \left(\frac{|u_{\lambda}|}{U_0} - 1 \right)} \\ \frac{U_0}{U_{0 \text{ ном}}} = \left(\frac{g_{\lambda}}{g_{\lambda \text{ ном}}} \right)^{0,93p} \\ \frac{\Delta G_{\text{BaO}}}{\Delta T} = C_S \cdot e^{-\frac{46000}{I_{\lambda \text{ ср. ном}}^2 \cdot C_2^* + T_{\text{ср}}}} \cdot G_{\text{BaO}}^* \\ I_{\text{Л}}^* = I_{\text{Л}}^*(0) \cdot G_{\text{BaO}}^* \\ \Phi_0^* = \left(\frac{|U_{\text{Л}}| - dU_{\text{Л-К}}(f)}{U_{\text{НОМ}} - dU_{\text{Л-К}}(50 \text{ Гц})} \right) \cdot f(I_{\text{Л}}^*) \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta G_{\text{BaO}}}{\Delta T} = C_S \cdot e^{-\frac{46000}{I_{\lambda \text{ ср. ном}}^2 \cdot C_2^* + T_{\text{ср}}}} \cdot G_{\text{BaO}}^* \\ I_{\text{Л}}^* = I_{\text{Л}}^*(0) \cdot G_{\text{BaO}}^* \\ \Phi_0^* = \left(\frac{|U_{\text{Л}}| - dU_{\text{Л-К}}(f)}{U_{\text{НОМ}} - dU_{\text{Л-К}}(50 \text{ Гц})} \right) \cdot f(I_{\text{Л}}^*) \end{array} \right. \quad (7)$$

Первое уравнение в (6) учитывает баланс средней концентрации электронов в плазме положительного столба разряда за счет использования приведенной проводимости лампы g_{λ} .

Второе уравнение в (6) учитывает зависимость проводимости лампы G_{λ} от приложенного напряжения u_{λ} при постоянной средней концентрации электронов (приведенной проводимости g_{λ}).

Третье уравнение в (6) описывает статическую ВАХ лампы.

При этом параметры $g_{\lambda \text{ ном}}$, $U_{0 \text{ ном}}$ (номинальное напряжение на лампе при постоянном номинальном токе), p (коэффициент, определяющий вид статической ВАХ лампы) соответствуют расчетному типу лампы для дифференциальной модели ВАХ А.Е. Краснопольского (6).

Первое уравнение (7) выражает скорость испарения оксида бария

$\frac{\Delta G_{\text{BaO}}}{\Delta T}$ с электродов лампы в зависимости от среднеквадратичного значения

тока лампы $I_{Л\text{ср}}^*$, температуры окружающей среды $T_{\text{ср}}$ и текущей массы оксида бария G_{BaO}^* .

Второе уравнение (7) выражает зависимость текущего значения среднего тока лампы $I_{Л}^*$ от текущей массы оксида бария.

Третье уравнение (7) определяет зависимость среднего светового потока Φ_0^* от частоты f , среднего тока и напряжения на лампе $U_{Л}$.

Таким образом, уравнения (6) и (7) описывают модель КЛЛ, позволяющую рассчитать основные параметры лампы (включая световые и эксплуатационные), необходимые для решения задачи оптимизации.

В третьей главе обосновывается целесообразность задания критерия оптимизации J^* в виде световой отдачи в момент времени эксплуатации, равный номинальному сроку службы лампы $T_{\text{ном}}$ ч:

$$\max \{J^* = \eta^*(T_{\text{ном}})\} = \Phi_0^*(T_{\text{ном}})/P_{\text{л}}^*(T_{\text{ном}}) \quad (8)$$

Такая формулировка задачи соответствует задаче статической оптимизации.

Проводится исследование ограничений оптимизации, и в конечном итоге, они формулируются в следующем виде (согласно ГОСТ Р МЭК 929-98):

1. $\Phi_0^*(100 \text{ ч}) \geq \Phi_{\text{ном}}^*$ (условие, определяющее номинальное значение светового потока);
2. $P_{\text{л}}^*(100 \text{ ч}) \leq P_{\text{л, ном}}^*$ (условие, определяющее номинальное значение электрической мощности);
3. $50000 \text{ Гц} \geq f \geq 20000 \text{ Гц}$ (рекомендуемый диапазон частот для ВЧ ПРА).

При этом $\Phi_{\text{ном}}^* = 1 \text{ о.е.}$ и $P_{\text{л, ном}}^* = 1 \text{ о.е.}$

Модель задачи оптимизации представлена на рисунке 4.

Задача оптимизации была решена в численном виде с помощью разработанной программы на языке программирования Delphi 5. Алгоритм расчета приведен в диссертации.

Решением задачи оптимизации являются следующие результаты:

1) оптимальное решение - прямоугольная форма кривой тока лампы при частоте 50 кГц амплитудой $\pm 70 \%$ от номинального тока: $P_{\text{л}}=36 \text{ Вт}$, $I_{\text{л}}=0,3 \text{ А}$, $\eta=122,4 \text{ лм/Вт}$, $\Phi=4406 \text{ лм}$, $T_{\text{ср}}=20900 \text{ ч}$;

2) номинальный световой поток - прямоугольная форма кривой тока лампы при частоте 50 кГц амплитудой $\pm 52 \%$ от номинального тока: $P_{\text{л}}=29,5 \text{ Вт}$, $I_{\text{л}}=0,224 \text{ А}$, $\eta=99,5 \text{ лм/Вт}$, $\Phi=2935 \text{ лм}$, $T_{\text{ср}}=63300 \text{ ч}$.

Далее проводится анализ результатов решения на основе физических основ повышения светоотдачи на высоких частотах.

Зависимости основных параметров лампы от значения тока лампы при прямоугольной (оптимальной) форме тока на частоте 50 кГц для КЛЛ 36 Вт представлены на рисунке 5.

На основании полученных данных можно судить о взаимосвязи параметров лампы при максимальной энергоэффективности.

В четвертой главе проводится разработка схемы ВЧ ПРА, основанного на оптимальных законах регулирования. К этому устройству предъявляются следующие требования:

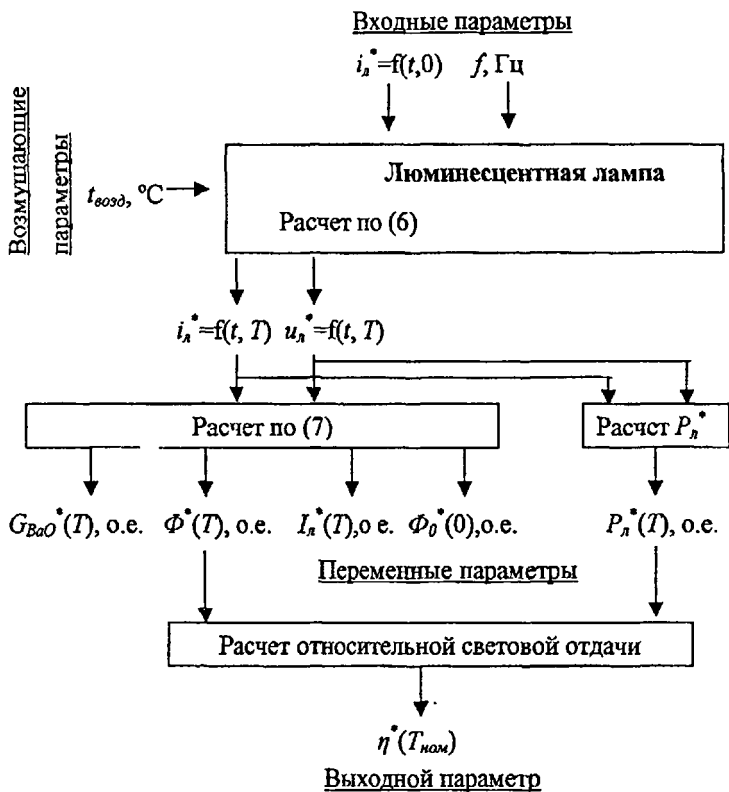


Рисунок 4 - Модель задачи оптимизации

1. Высокий коэффициент мощности ВЧ ПРА (не менее 0,9) и высокий КПД (не менее 0,9);
2. Защита от работы ВЧ ПРА в аномальных режимах питающего напряжения (пониженное напряжение сети, перенапряжение в сети, короткое замыкание внутри ВЧ ПРА);
3. Простота построения схемы и надежность работы;
4. Удовлетворение требований к рабочим характеристикам лампы в соответствии с ГОСТ Р МЭК 929-98.

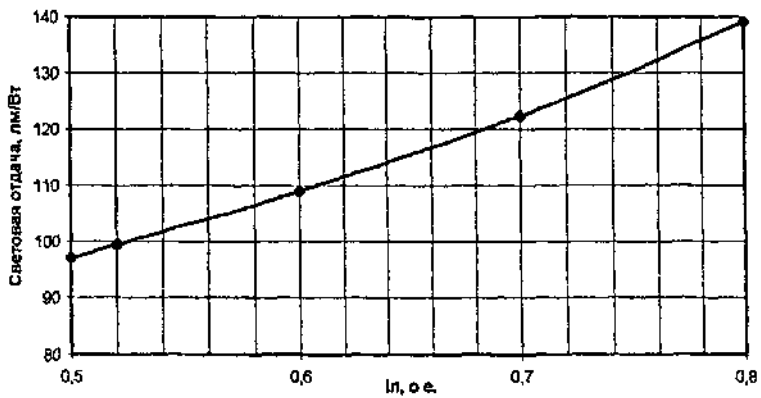
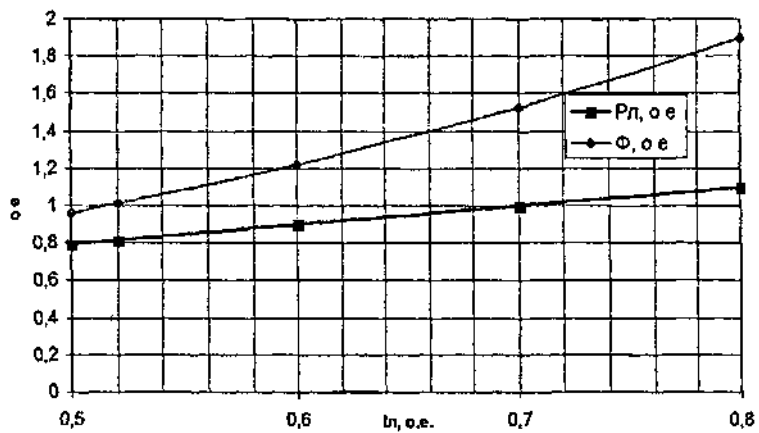
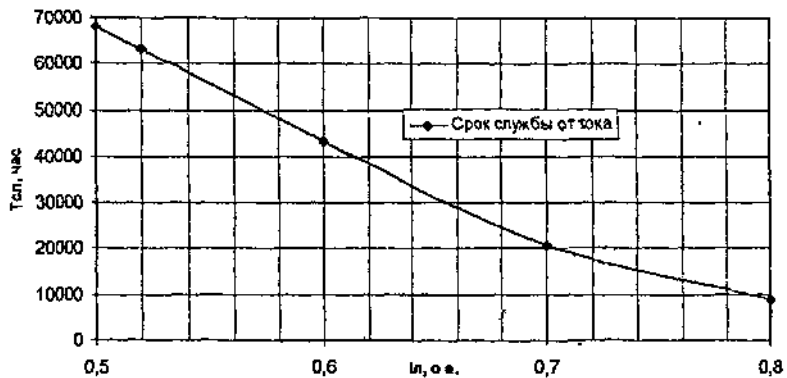


Рисунок 5 - Расчеты статического режима лампы при 50 кГц при прямоугольной форме тока

Анализ существующих ключевых элементов для применения в ВЧ ПРЛ выявил технико-экономические преимущества полевых транзисторов по сравнению с биполярными на соответствие требованиям 2 и 3. Полевые транзисторы лучше переносят короткие замыкания и не требуют применения схем управления с большим управляющим током, за счет чего возможно упрощение их схем управления и повышение надежности.

Для удешевления ВЧ ПРА при построении целесообразно ориентировать на использование отечественной элементной базы, в том числе аналогов зарубежных микросхем.

В качестве исходных данных при расчетах элементов ВЧ ПРА принято:

- одноламповый ВЧ ПРА для КПП 36 Вт (номинальная мощность);
- мощность лампы 36 Вт;
- оптимальная форма тока лампы - прямоугольная с амплитудой 70 % от номинального значения;
- напряжение сети 220В -30..+20 %, частота сети 50 Гц.

Для поддержания стабильного режима работы ламп разработаны алгоритм и схема управления инвертирующим АККМ, обеспечивающие стабилизацию выходного постоянного напряжения в широких пределах изменения сетевого однофазного напряжения. Разработанный АККМ имеет ряд преимуществ по сравнению со схемами повышающих АККМ (широкий диапазон выходного напряжения, простая схема управления) (рисунок 6).

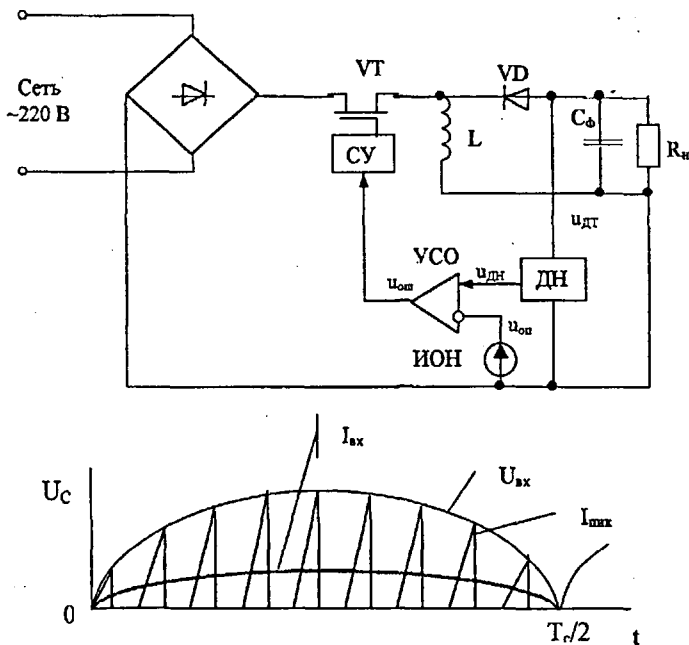


Рисунок 6 - Схема и диаграмма работы инвертирующего активного корректора на полупериоде сети

В результате анализа разработанного инвертирующего ЛККМ (рисунок 7) получены расчетные формулы для определения статического режима АККМ на требуемую нагрузку (рисунок 8).

Математическое моделирование АККМ в статических и динамических режимах показало работоспособность алгоритма управления, адекватность расчетных формул и высокие динамические характеристики переходного процесса в разработанном АККМ.

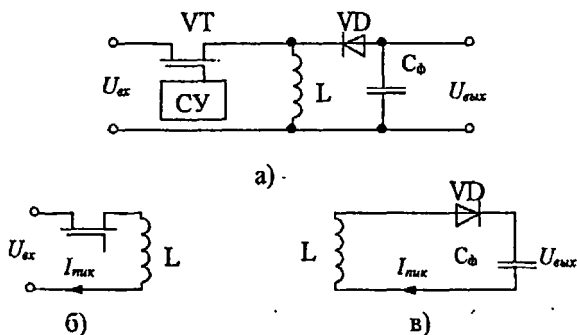


Рисунок 7 - Структурная схема инвертирующего активного корректора коэффициента мощности:

- а) схема на интервале времени, равном периоду преобразования;
- б) момент перед выключением ключевого транзистора;
- в) момент после выключения ключевого транзистора

$$f := 30 \cdot 10^3 \text{ частота преобразования, Гц} \quad T := \frac{1}{f} \text{ Период преобразования}$$

$$\omega := 314 \text{ угловая частота сети 50 Гц}$$

$$L := 2 \cdot 10^{-3} \text{ индуктивность, Гн}$$

$$U_s := 220 \text{ сетевое напряжение, В} \quad 220 \cdot 0.7 = 154 \text{ В} \quad 220 \cdot 1.2 = 264 \text{ В}$$

$$\gamma := 0.3 \text{ относительная длительность открытого состояния ключа, о.е.}$$

$$I_s := \frac{U_s \cdot T \cdot \gamma^2}{2 \cdot L} \text{ Входной ток АККМ, А} \quad I_s = 0.165 \text{ А}$$

$$P := \frac{U_s^2 \cdot T \cdot \gamma^2}{2 \cdot L} \text{ Выходная мощность, Вт} \quad P = 36.3 \text{ Вт}$$

$$I_{\text{пик}} := \frac{\sqrt{2} \cdot U_s \cdot T \cdot \gamma}{L} \text{ Импульсный ток транзистора, диода, индуктивности} \quad I_{\text{пик}} = 1.556 \text{ А}$$

Рисунок 8 – Расчеты статического режима инвертирующего АККМ в MathCAD 2000

$R_n := 480$ Нагрузка, Ом

$U_n := \sqrt{P \cdot R_n}$ Напряжение на нагрузке, В

$U_n = 132$ В

$I_n := \frac{P}{U_n}$ Ток нагрузки

$I_n = 0.275$ А

$\gamma := \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot P}{T}}}{U_s}$ Закон
регулирования

Продолжение рисунка 8

Для управления люминесцентными лампами разработан ВЧ генератор на базе схемы генератора Ройера, который обеспечивает рекуперацию избыточной энергии, поддержание стабильной амплитуды выходного прямоугольного напряжения, и, кроме того, позволяет ограничивать ток при перегрузках.

В результате исследований была разработана схема ВЧ ПРА для одной лампы КЛЛ 36 Вт при сетевом однофазном переменном напряжении 150..265 В (220В -30..+20 %) при высоких коэффициентах мощности и КПД (не менее 0,9). Экспериментальный образец ВЧ ПРА с КЛЛ обеспечивает увеличение значения светового потока КЛЛ с 2900 до 4060 лм при увеличении расчетного срока службы лампы с 10 до 20 тысяч часов. Установлена адекватность расчетных моделей и формул разработанных устройств результатам экспериментов.

В пятой главе сравниваются экономические показатели вариантов освещения на ВЧ ПРА КЛЛ, электромагнитных ПРА (ЭМ ПРА) ЛЛ и на лампах накаливания (ЛН) для помещения телятника-профилактория. В результате расчетов вариант освещения на ЛЛ исключается как самый неэкономичный по критерию максимума чистого дисконтированного дохода. Вариант ВЧ ПРА КЛЛ обеспечивает экономию электроэнергии 32216 кВтч/год и затрат на электроэнергию 40592 руб./год, экономию по эксплуатационным расходам 35166 руб./год по сравнению с вариантом освещения ЭМ ПРА ЛЛ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ существующих математических моделей позволил разработать модель КЛЛ, учитывающую основные эксплуатационные и световые параметры люминесцентных ламп, а также проанализировать влияние электрических величин на основные выходные параметры лампы. Применение модели позволяет определить рациональные параметры регулирования ламп в составе комплекта ПРА-КЛЛ.

Разработан стенд для экспериментальных исследований параметров ламп и методика расчета полезного срока службы для целей идентификации уравнений модели КЛЛ.

2. Сформулирована математическая задача оптимизации лампы, включающая в себя: разработку математической модели объекта оптимизации на основе световых и эксплуатационных параметров лампы, обоснование критерия оптимизации и выбор метода решения задачи оптимизации, формирование ограничений на управляющие воздействия.

3. Синтезированы оптимальные энергоэффективные законы регулирования КЛЛ в составе ВЧ ПРА-КЛЛ. При этом достигается повышение световой отдачи КЛЛ на 40-60 % от его номинального значения.

4. Синтезирована схема управления ВЧ ПРА, основанная на эффективных законах регулирования. Разработанный в составе ВЧ ПРА, инвертирующий АККМ обеспечивает стабилизацию режима работы лампы при изменениях сетевого напряжения. Высокочастотный генератор для питания лампы обеспечивает стабилизацию амплитуды прямоугольного напряжения на лампе. На обе разработки идентифицированы формулы расчета статического режима на требуемую электрическую нагрузку.

5. Исследован экспериментальный образец ВЧ ПРА КЛЛ. Производственные испытания показали, что образец ВЧ ПРА отвечает предъявляемым требованиям к энергоэффективности закона регулирования. Экономия электроэнергии с ВЧ ПРА КЛЛ составляет не менее 40-60 %.

6. Проведенное экономическое сравнение трех вариантов осветительной установки телятника-профилактория (ЛН, ЭМ ПРА с ЛЛ и ВЧ ПРА с КЛЛ) по критериям максимума чистого дисконтированного дохода и сроку окупаемости дополнительных капитальных вложений показало, что оптимальным является вариант освещения на ВЧ ПРА КЛЛ. Реализация варианта освещения на ВЧ ПРА КЛЛ в сравнении с вариантом ЭМ ПРА с традиционными люминесцентными лампами позволяет получить:

- годовую экономию электроэнергии в размере 32216 кВтч/год (50 %);
- экономию затрат на электроэнергию в размере 40592.2 руб/год;
- экономию эксплуатационных расходов в размере 35166.4 руб/год.

Полученные результаты использованы для разработки технического задания на ВЧ ПРА КЛЛ.

Материалы технического задания на ОКР по ВЧ ПРА для КЛЛ переданы в ООО ПКП «Статус».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Амузаде, А.С. Разработка перспективных пускорегулирующих аппаратов для компактных люминесцентных ламп / А.С. Амузаде // Вестник Хакасского технического института-филиала КГТУ /Под ред. СИ. Рячихина, КГТУ, Абакан, 2001.-№9.-С. 109-111.

2. Амузаде, Л.С. Разработка стенда для исследования люминесцентных ламп / А.С. Лмузаде, В.И. Пантелеев // Сборник тезисов докладов молодых ученых Хакасского технического института-филиала КГТУ /Под ред. СИ. Рябихина, КГТУ, Абакан, 2001. - С. 51-55.
3. Пантелеев, В.И. Разработка электронного балласта для компактных люминесцентных ламп / В.И. Пантелеев, А.С. Амузаде // Сборник тезисов докладов молодых ученых Хакасского технического института-филиала КГТУ /Под ред. СИ. Рябихина, КГТУ, Абакан, 2001. - С 55-60.
4. Амузаде, А.С. Анализ полезного срока службы люминесцентной лампы / А.С. Амузаде, В.И. Пантелеев // Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. Вып. 8 / Под ред. А.А. Михеева, В.А. Кулагина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002.-С. 130-133.
5. Амузаде, А.С. Специализированные микросхемы электронных балластов для люминесцентных ламп / А.С. Амузаде, В.И. Пантелеев // Электрика. - 2003- № 2- С 19-23.
6. Амузаде, А.С. Управление инвертирующим активным корректором коэффициента мощности люминесцентных ламп / А.С. Амузаде, В.И. Пантелеев // Современные средства и системы автоматизации - гарантия высокой эффективности производства. - Томск, Изд-во Томского ун-та, 2003.- С. 187-190.
7. Пантелеев, В.И. Разработка устройства управления компактными люминесцентными лампами / В.И. Пантелеев, А.С. Амузаде // Пути и технологии экономии и повышения эффективности использования энергетических ресурсов региона. В двух частях. Ч. 2: Материалы международной научно-технической конференции/ Редкол.: Ю.Г. Кабалдин (отв. ред.) и др. - Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2003. - С. 14-18.
8. Амузаде, А.С. Энергоэффективные светильники на базе компактных люминесцентных ламп / А.С. Амузаде, В.И. Пантелеев // Проблемы и перспективы энергообеспечения города: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции / Под ред. В.М. Журавлева, В.А. Кулагина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. - С. 197-201.
9. Амузаде, А.С. Высокочастотные пускорегулирующие аппараты для повышения энергоэффективности компактных люминесцентных ламп / А.С. Амузаде, В.И. Пантелеев // В кн. Достижения науки и техники - развитию Норильского промышленного района. В двух частях. Ч. 1.- Норильск, 2003.- С. 36-38.



8565