

На правах рукописи



**Лисицкий Константин Евгеньевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ  
ФЛИКЕРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Братский государственный университет» (БрГУ).

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
**Струмяк Анатолий Владимирович**

Официальные оппоненты: **Пантелеев Василий Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский федеральный  
университет», Политехнический институт,  
директор

**Коверникова Лидия Ивановна**  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт систем  
энергетики им. Л.А.Мелентьева Сибирского  
отделения Российской академии наук, отдел  
электроэнергетических систем, старший  
научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
г. Иркутск.

Защита состоится «26» июня 2017 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к.355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к.407 и на сайте: <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2017-2/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 003.017.01  
доктор технических наук, профессор



**Клер Александр Матвеевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Электроприёмники с резкопеременным режимом работы являются причиной возникновения колебаний напряжения в электрической сети, которые, в свою очередь, обуславливают возникновение фликера – субъективного восприятия человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения. К примеру, если у лампы накаливания снизить напряжение питания, то яркость ее свечения снизится, а при увеличении питающего напряжения – увеличится. При систематическом изменении питающего напряжения изменения яркости лампы негативно сказываются на человеке, вызывая у него излишнее утомление.

Электромагнитная совместимость световых источников с электрической сетью обеспечивается соответствием колебаний напряжения в электрической сети нормам качества электрической энергии. Оценка соответствия колебаний напряжения нормам качества электрической энергии осуществляется по значениям кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  – меры фликера, оцениваемой в течение десяти минут, и длительной дозы фликера  $P_{lt}$  – меры фликера, оцениваемой в течение двух часов по последовательным значениям  $P_{st}$ . Нормы этих показателей качества электрической энергии установлены по кривым допустимых колебаний напряжения, которые получены при использовании ламп накаливания мощностью 60 Вт. Все стандартные методы оценки фликера основаны на использовании этих кривых. То есть оценка колебаний напряжения выполняется по виртуальному фликеру, моделируемому с помощью кривых допустимых колебаний напряжения. Фактические колебания светового потока ламп и фактические уровни фликера при этом не учитываются.

В настоящее время широкое распространение получили лампы с чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети, отличающейся от ламп накаливания мощностью 60 Вт (далее, ламп различных типов). При одинаковых колебаниях напряжения в электрической сети у этих ламп возникает фликер, разный по уровню, который стандартными методами не учитывается. Разность между реальными уровнями фликера ламп различных типов и уровнем фликера, моделируемым стандартными методами, является методической погрешностью.

Таким образом, проблема достоверной оценки фликера ламп различных типов обуславливает **научную актуальность диссертационной работы.**

Выбор мероприятий по нормализации фликера и определение их эффективности проводятся по результатам его оценки. Методическая погрешность, возникающая при оценке фликера ламп различных типов стандартными методами, может привести к значительным экономическим затратам и выбору неэффективных мероприятий. В этом случае фактические уровни фликера могут оказаться за пределами норм, определяемых действующими стандартами. С другой стороны, при фактическом отсутствии фликера действующие нормы могут предписывать ряд затратных мероприятий по его нормализации.

В связи с вышеизложенным, определение необходимости проведения мероприятий по нормализации фликера и оценка их эффективности обуславливают **практическую актуальность диссертационной работы.**

## Степень разработанности темы

Первые работы, в которых упоминается фликер, опубликованы в начале XX века американскими учеными *Г. Айвсом* и *И. Лэнгмуром*. В них отмечается, что уровень фликера зависит от размаха колебаний напряжения в электрической сети, их частоты и физиологического состояния человека, наблюдающего изменения яркости световых источников.

Исследованиями по определению уровней колебаний напряжения в электрической сети, которые вызывают изменения яркости ламп, воспринимаемые человеком, в 1930 г. занималась корпорация *General electric*. Она разработала кривые фликера и опубликовала их в сборнике трудов *GET-1008L*, который в 1969 г. был переиздан в виде стандарта *IEEE std.141*. Кривые фликера стали прототипом кривых допустимых колебаний напряжения отечественного стандарта *ГОСТ 13109-97*, которые в настоящее время используются в расчетных методах оценки фликера.

Значительный вклад в сферу инструментальной оценки фликера внесли ученые *Dzn Lange, C. Rashbass, C. Mirra, G. Sani* и др. Используя кривые допустимых колебаний напряжения, они выполнили математическое описание процесса восприятия фликера в системе «лампа – глаз человека – мозг человека», что позволило в 1970-е годы работникам *International Union for Electricity applications* создать инструментальное средство измерения фликера – фликерметр. В 1986 году *Международной электротехнической комиссией* был утвержден проект фликерметра, а в 1997 году вступил в силу стандарт, установивший функциональные и конструктивные требования к фликерметрам. В соответствии с этим стандартом, калибровка фликерметров осуществлялась с помощью нормализованной частотной характеристики прибора (НЧХП), описывающей параметры колебаний напряжения в электрической сети, вызывающие у ламп накаливания мощность 60 Вт уровень фликера  $P_{st}=1$  о.е. В стандарте *МЭК-868* НЧХП была представлена только для электрических сетей переменного тока с частотой 50 Гц. Поэтому оценка фликера в электрических сетях с частотой 60 Гц выполнялась некорректно. НЧХП для электрической сети с частотой 60 Гц впервые была представлена в стандарте *IEEE 1453-2004*.

В отечественных стандартах, устанавливающих нормы качества электрической энергии *ГОСТ 13109-67* и *ГОСТ 13109-87*, фликер не нормировался из-за отсутствия описания методов его оценки. Этот пробел устранили *И.В. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко*. Они выполнили обзор зарубежных стандартов и проработали вопросы нормирования фликера и его нормализации. В последующих отечественных нормах качества электрической энергии *ГОСТ 13109-97* были приведены расчетные методы оценки фликера.

В настоящее время основные положения действующих отечественных стандартов заимствованы из зарубежных стандартов. Однако методы оценки фликера, описанные в них, не позволяют выполнить достоверную оценку фликера ламп различных типов и оценить необходимость его нормализации. Поэтому в данной работе рассматриваются вопросы расчета НЧХП для ламп различных типов для дальнейшего использования полученных НЧХП при оценке фликера и выборе мероприятий по его нормализации.

## **Соответствие диссертации Паспорту научной специальности**

Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

П.6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике;

П.12. Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению.

**Целью работы** является совершенствование методов оценки фликера в электрических сетях при использовании ламп различных типов, а также обеспечение выбора и проведения эффективных мероприятий по нормализации фликера.

Поставленная цель в диссертационной работе осуществляется решением следующих **задач**:

1. Анализа стандартных методов оценки фликера, конструктивных особенностей ламп различных типов и принципа их действия.

2. Разработки подхода по совершенствованию стандартных методов оценки фликера, который позволит снизить разницу между моделируемыми и реальными уровнями фликера, при его оценке, до допустимых действующими нормами значений.

3. Разработки методики выбора и проведения мероприятий по нормализации фликера.

**Объектом исследования** являются электрические сети с колебаниями напряжения.

**Предметы исследования:** фликер, вызванный колебаниями напряжения в электрической сети; методы оценки фликера; чувствительность к колебаниям напряжения в электрической сети ламп различных типов.

**Методы исследования.** Обработка данных измерений, полученных при использовании разработанного и созданного аппаратно-программного комплекса, осуществляется на базе методов математической статистики. Аналитическое описание функций связи колебаний светового потока с колебаниями напряжения выполнена с помощью метода линейной регрессии. Для аналитического описания стандартной НЧХП и НЧХП для ламп различных типов использован метод последовательных приближений. Для инструментальной оценки колебаний напряжения в действующей электрической сети для нормализации фликера применено быстрое преобразование Фурье.

**Научная новизна.** В результате выполнения работы получены новые научные результаты:

1. Предложена методика расчета НЧХП.
2. Усовершенствована модель фликерметра.
3. Разработана методика по нормализации фликера посредством замены ламп.
4. Разработана методика по нормализации фликера на основе данных расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети.
5. Разработана методика по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

### **Практическая значимость работы.**

1. Разработанный и созданный при реализации методики расчета НЧХП аппаратно-программный комплекс может быть использован при исследовании уровней фликера ламп различных типов.

2. НЧХП, рассчитанные по предложенной методике, могут быть использованы для совершенствования стандартных расчетных методов оценки фликера и адаптации стандартной модели фликерметра при оценке фликера ламп различных типов.

3. Усовершенствованная модель фликерметра и рассчитанные НЧХП для ламп различных типов предложены для внесения в *ГОСТ Р 51317.4.15-2012*.

4. Поправочные коэффициенты, определенные по методике расчета НЧХП, позволяют выполнить достоверную оценку фликера на этапе проектирования электрических сетей.

5. Применение усовершенствованной модели фликерметра позволяет выполнить достоверную оценку фликера ламп различных типов в реальном времени.

6. Разработанные методики по нормализации фликера, в ряде случаев, позволяют отказаться от проведения затратных технических мероприятий.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика расчета НЧХП.

2. Усовершенствованная модель фликерметра.

3. Методика по нормализации фликера посредством замены ламп.

4. Методика по нормализации фликера на основе данных расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

5. Методика по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность результатов, полученных расчетными методами, подтверждается данными, полученными методом измерений.

**Реализация работы.** Результаты диссертационной работы использованы БрГУ, ООО «Лесные инновации», ООО «Промышленная металлургия» при выборе мероприятий по нормализации фликера. Усовершенствованная модель фликерметра и предложенная методика расчета НЧХП используются в учебном процессе кафедры электроэнергетики и электротехники БрГУ при изучении дисциплины «Качество электроэнергии в системах электроснабжения». Разработанная методика расчета НЧХП используется при создании средств исследования показателей качества электрической энергии ООО «Современные электротехнические технологии».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и отдельные её разделы докладывались и обсуждались:

- на Региональной научно-технической конференции «Братский государственный университет – энергетике региона», БрГУ, Братск, 2010г.;

- Всероссийской научно-технической конференции «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири», БрГУ, Братск, 2010, 2011, 2014, 2015гг.;

- Всероссийской научно-практической конференции «Братская ГЭС: история строительства, опыт эксплуатации, перспективы», БрГУ, Братск, 2011г.;

- III международной научно-практической конференции «Энергетика глазами молодежи», УрФУ им. Первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, 2012 г.;

- семинаре лаборатории управления функционированием электроэнергетических систем №43, ИСЭМ СОРАН, Иркутск, 2013 г.;

- XLIV конференции-конкурсе научной молодежи «Системные исследования в энергетике», ИСЭМ СОРАН, Иркутск, 2014 г.;

- международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии», Москва, 26÷28 ноября 2014 г.;

- Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке, Инновационное развитие и управление», Иркутск, 1÷3 сентября 2015 г.;

- Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, 19÷20 мая 2016 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 5 из них – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора на соискание доктора наук. Получен 1 патент Российской Федерации.

**Личный вклад автора.** Все теоретические и методические положения, разработка и создание аппаратно-программного комплекса, численные данные измерений, а также аналитические результаты получены лично соискателем.

Постановка задач и анализ результатов обсуждались совместно с научным руководителем.

**Связь работы с научными программами, планами, темами, грантами.** Диссертационная работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы №06-У-1103, а также в рамках Федеральной целевой программы развития инновационной инфраструктуры ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет» договор, №13.G26.31.0002 от 1 июля 2010 г.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений; изложена на 144 стр. машинописного текста, включает 57 рисунков, 39 таблиц и список литературы из 107 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования. Сформулирована цель, показана структура работы, отмечена научная новизна проведенных исследований и их практическая значимость. Представлены сведения о введении диссертационной работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведены нормы фликера в электрических сетях, согласно которым, в точках передачи электрической энергии её пользователям величина  $P_{st}$  не должна превышать значения 1,38 о.е., величина  $P_{lt}$  – значения 1 о.е. В точках общего присоединения потребителей электрической энергии, оснащенных лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение величина  $P_{st}$  не должна превышать значения 1 о.е., а величина  $P_{lt}$  – значения 0,65 о.е.

Обзор общеизвестных методов оценки фликера позволил выделить два основных подхода к его оценке:

- применение расчетных методов оценки фликера;
- применение метода непосредственных измерений  $P_{st}$ .

Большинство расчетных методов имеют допущение о том, что колебания напряжения в электрической сети происходят с неизменной частотой и амплитудой. Данное положение используется при расчете значений  $P_{st}$  с помощью представленной в *ГОСТ 13109-97* кривой допустимых колебаний напряжения, ограничивающей порог восприятия фликера, под которым понимают минимальную

величину изменений яркости световых источников, приводящую к ощущению мерцаний. Порогу восприятия фликера соответствует  $P_{st}=1$  о.е. В этом стандарте кривая допустимых колебаний напряжения представлена в виде спектра частот колебаний напряжения в электрической сети,  $r$  и соответствующих им значений амплитуды относительных изменений напряжения,  $d_{P_{st}=1}$  (рис.1).

Кратковременную дозу фликера рассчитывают по выражению

$$P_{st} = \frac{d(r)}{d_{P_{st}=1}(r)}, \quad (1)$$

где  $d$  – амплитуда относительных изменений напряжения, %;  $r$  – частота колебаний напряжения, 1/мин.

Область применения расчетных методов ограничена приближенной оценкой фликера на этапе проектирования электрических сетей.

Оценка фликера в действующих электрических сетях при колебаниях напряжения произвольного вида может быть выполнена методом непосредственных измерений  $P_{st}$  с помощью фликерметра.

Испытания фликерметров проводятся в соответствии с *ГОСТ Р 51317.4.15–2012*. В этом стандарте НЧХП представлена в табличной форме в виде спектра частот колебаний напряжения в электрической сети,  $f_{кн}$  и соответствующих им значений  $d_{P_{st}=1}$ . Согласно положениям этого стандарта, при колебаниях напряжения в электрической сети с параметрами НЧХП фликерметр должен регистрировать  $P_{st}=1$  о.е.

На рис.2 представлено графическое изображение стандартной НЧХП, являющейся аналогом кривой допустимых колебаний напряжения, изображенной на рис.1.

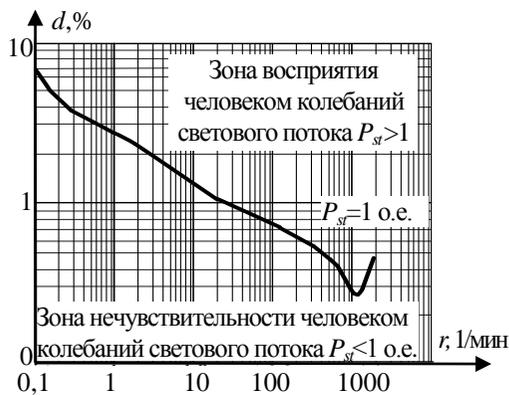


Рисунок 1 – Кривая допустимых колебаний напряжения



Рисунок 2 – Графическое изображение стандартной НЧХП

Область, расположенная выше кривой допустимых колебаний напряжения и область, расположенная выше НЧХП, соответствует зоне восприятия человеком колебаний светового потока ламп.

Проблема применения представленных на рис.1 и 2 характеристик обусловлена тем, что они получены при использовании ламп накаливания мощностью 60 Вт. В настоящее время широкое распространение получили лампы, имеющие другую

конструкцию и иной принцип действия по сравнению с лампами накаливания. Это отличие обуславливает разницу в чувствительности таких ламп к колебаниям напряжения в электрической сети.

На рис.3 представлен график измеренного светового потока ламп различных типов при колебаниях напряжения одного уровня.

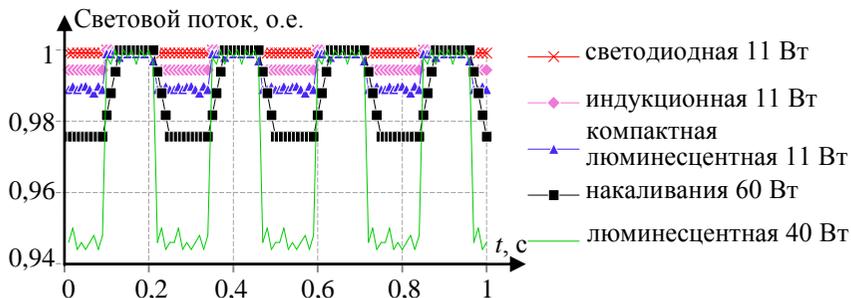


Рисунок 3 – График измеренного светового потока ламп различных типов при колебаниях напряжения одного уровня

Из рис. 3 видно, что при колебаниях напряжения одного уровня у ламп различных типов наблюдаются разные колебания светового потока. У более чувствительных к колебаниям напряжения, по сравнению с лампами накаливания источников света, таких как люминесцентные лампы, колебания светового потока больше. Поэтому при одинаковых колебаниях напряжения у люминесцентных ламп наблюдается больший, по сравнению с лампами накаливания, уровень фликера. И наоборот, в случаях использования компактных люминесцентных, индукционных и светодиодных ламп колебания светового потока будут меньше, по сравнению со случаем использования ламп накаливания. Следовательно, уровень фликера таких источников света будет меньшим.

Уровни фликера при использовании стандартных методов моделируются по параметрам колебаний напряжения с помощью кривых допустимых колебаний напряжения. Фактические уровни фликера при этом не учитываются. Разница между фактическими и моделируемыми уровнями фликера обуславливает методическую погрешность, которая не позволяет использовать стандартные методы для оценки фликера ламп различных типов.

Для устранения методической погрешности, возникающей при оценке фликера ламп различных типов стандартными методами, и уточнения необходимости нормализации его уровня необходимо совершенствование стандартных методов оценки фликера путем сопоставления колебаний светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания.

**Во второй главе** отмечается, что фликер, как явление, связанное с колебаниями светового потока ламп и колебаниями напряжения в электрической сети, можно рассматривать с двух сторон: с точки зрения электромагнитной совместимости электрических сетей со световыми источниками и с точки зрения санитарных норм.

В первом случае *ГОСТ 30804.3.3-2013* регламентирует оценку колебаний напряжения в электрической сети по амплитуде относительных изменений напряжения,  $d$ , которую определяют следующим образом

$$d = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{U_{max} - U_{min}}{U} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $\Delta U$  – изменение установившегося напряжения;  $U_{max}$  и  $U_{min}$  – соответственно, максимальное и минимальное значения напряжения за период колебаний напряжения, В;  $U$  – действующее значение напряжения, В.

На рис.4 представлен график колебаний напряжения в электрической сети, по которому определяется  $d$ .



Рисунок 4 – График колебаний напряжения в электрической сети

Во втором случае *СНиП 23-05-95* и *ГОСТ 54945-2012* регламентируют оценку колебаний светового потока по величине коэффициента пульсации освещенности,  $K_n$ , который определяют следующим образом

$$K_n = \frac{E_{max} - E_{min}}{2 \cdot E_{cp}} \cdot 100\% \quad (3)$$

где  $E_{max}$  и  $E_{min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения освещенности за период повторения колебаний светового потока, лк;  $E_{cp}$  – среднее значение освещенности за период повторения колебаний светового потока, лк.

На рис.5 представлен график колебаний светового потока лампы накаливания, по которому определяется  $K_n$ .



Рисунок 5 – График колебаний светового потока лампы накаливания

Функциональная связь колебаний светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания может быть представлена следующим выражением

$$K_n = H(d, f_{ки}), \quad (4)$$

где  $H$  – функция связи колебаний светового потока лампы с колебаниями напряжения в цепи её питания.

Выражение (4) должно быть использовано при расчете НЧХП для ламп различных типов. В свою очередь, применение НЧХП ламп различных типов позволит выполнить достоверную оценку фликера.

Разработана методика расчета НЧХП для ламп различных, которая предполагает процедуры, выполняемые в следующем порядке:

1. Определение кривой допустимых колебаний светового потока.

Данный пункт требует использования аппаратного обеспечения, позволяющего производить измерения колебаний светового потока ламп при заданных параметрах питающего их напряжения.

С помощью аппаратного обеспечения у ламп накаливания мощностью 60 Вт при заданных параметрах колебаний напряжения, соответствующих стандартной НЧХП, проводится определение значений  $K_{лн}$ .

На рис.6 представлена графическая интерпретация кривой допустимых колебаний светового потока.



Рисунок 6 – Кривая допустимых колебаний светового потока

2. Расчёт функции связи колебаний светового потока лампы накаливания мощностью 60 Вт с колебаниями напряжения в цепи её питания,  $H_{лн}$ .

Средством *Basic Fitting* прикладного пакета программ *MatLab* данные колебаний напряжения и соответствующих им колебаний светового потока ламп накаливания мощностью 60 Вт приводятся к виду (4).

3. Определение функции связи колебаний светового потока ламп различных типов с колебаниями напряжения в цепи её питания,  $H_{лн}$ .

Средством *Basic Fitting* прикладного пакета программ *MatLab* данные колебаний напряжения и соответствующие им колебания светового потока ламп различных типов приводятся к виду (4).

4. Расчет значений амплитуды относительных изменений напряжения, эквивалентных колебаниям светового потока ламп,  $d_{лн}^{экв}$ .

Амплитуда относительных изменений напряжения, эквивалентная колебаниям светового потока, – параметр колебаний напряжения, описывающий изменения напряжения, при которых у лампы накаливания мощностью 60 Вт наблюдаются такие же колебания светового потока, что и у применяемой лампы.

Расчет значений амплитуды относительных изменений напряжения, эквивалентных колебаниям светового потока ламп производится по следующему выражению

$$d_{лн}^{экв}(f_{кн}) = d(f_{кн}) \cdot \frac{H_{лн}(d, f_{кн})}{H_{лн}(d, f_{кн})}. \quad (5)$$

5. Расчет значений поправочного коэффициента,  $p^n(f_{кн})$ .

Величина  $p^n(f_{кн})$  определяется по следующему выражению

$$p^n(f_{кн}) = \frac{d_{лн}^{экв}(f_{кн})}{d(f_{кн})}. \quad (6)$$

6. Расчет параметров НЧХП для ламп различных типов.

Параметры НЧХП для ламп различных типов рассчитываются по следующему выражению

$$d_{P_{st}=1}^n(f_{кн}) = \frac{d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн})}{p^n(f_{кн})}, \quad (7)$$

где  $d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн})$  – амплитуда относительных изменений напряжения, соответствующая стандартной НЧХП, %.

Параметры НЧХП для ламп различных типов при значениях частот колебаний напряжения, приведенных в *ГОСТ Р 51317.4.15-2012*, могут быть измерены. С помощью аппаратного обеспечения для ламп различных типов выполняется поиск значений  $d$  с заданной  $f_{кн}$ , при значениях  $K_n$ , соответствующих кривой допустимых колебаний светового потока. При этом частота колебаний напряжения задается в соответствии с табличными значениями  $f_{кн}$  стандартной НЧХП.

При необходимости достоверной оценки фликера во всем диапазоне частот колебаний напряжения от 0,05 до 40 Гц необходимо выполнение всех пунктов представленной методики.

Для достоверной расчетной оценки фликера ламп различных типов достаточно использовать поправочный коэффициент,  $p^n(f_{кн})$ , полученный в соответствии с выражением (6), и значение  $P_{st}$ , полученное стандартными расчетными методами

$$P_{st}^n = p^n(f_{кн}) \cdot P_{st}. \quad (8)$$

Представленная методика была использована в составе разработанного и созданного на кафедре электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета аппаратно-программного комплекса для определения параметров кривой допустимых колебаний светового потока и параметров НЧХП для ламп различных типов.

Аппаратно-программный комплекс позволяет выполнять регистрацию колебаний светового потока ламп различных типов и реализовывать в цепи их питания колебания напряжения с заданными параметрами.

Функциональная схема аппаратно-программного комплекса представлена на рис.7, в соответствии с которой контроль управляемого источника питания (УИП) осуществляется через дифференциальный вход (ДВ) сигналом с канала цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) персонального компьютера (ПК), программно задающего параметры колебаний напряжения. УИП преобразует сетевое напряжение и через программируемый выход (ПВ) и осуществляет питание исследуемой лампы. Величина светового потока исследуемой лампы регистрируется фотоприемником (ФП). Одновременно усиленный сигнал ФП и проходящий через преобразователь напряжения сигнал цепи питания исследуемой лампы поступают через АЦП в программную среду ПК для записи.



Рисунок 7 - Функциональная схема аппаратно-программного комплекса

Погрешность использования аппаратно-программного комплекса зависит от трех величин, определяемых в процессе описания функции зависимости колебаний светового потока ламп от колебаний напряжения в цепи их питания:

- коэффициента пульсации освещенности;
- амплитуды относительных изменений напряжения;
- частоты возникновения колебаний напряжения в электрической сети.

С учетом погрешности, вносимой аппаратно-программным комплексом в результаты измерений, выражение (4) примет вид

$$K_n \pm \frac{\Delta K_n}{100} = H(d \cdot (1 \pm \Delta d), f_{кн} \pm \delta f_{кн}), \quad (9)$$

где  $\Delta K_n$  – погрешность расчета коэффициента пульсации освещенности, %;  $\Delta d$  – погрешность расчета амплитуды относительных изменений напряжения, %;  $\delta f_{кн}$  – погрешность определения частоты колебаний напряжения, Гц.

Для оценки достоверности результатов измерений, выполненных аппаратно-программным комплексом, определены максимальные значения  $\Delta K_n$ ,  $\Delta d$ ,  $\delta f_{кн}$ , с учетом которых функция связи колебаний светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания имеет следующий вид

$$K_n \pm 0,02142 = H(d(1 \pm 0,01492), f_{кн} \pm 0,025). \quad (10)$$

В ходе анализа результатов измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса, у ламп накаливания мощностью 60 Вт выявлена близкая к линейной зависимость между величинами  $K_n$  и  $d$ , а также между величинами  $K_n$  и  $f_{кн}$ . Поэтому функция связи вида (4) может быть представлена следующим выражением

$$K_n = d \cdot (A + B \cdot f_{кн}), \quad (11)$$

где  $A$  – коэффициент полинома, о.е.;  $B$  – коэффициент полинома, Гц<sup>-1</sup>.

У источников света, имеющих отличный от ламп накаливания принцип действия, в процессе анализа результатов измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса, зависимость между  $K_n$  и  $f_{кн}$  не выявлена. Также в ходе анализа выявлена зависимость между  $K_n$  и  $d$ . Поэтому функцию связи колебаний светового потока таких ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания можно описать выражением следующего вида:

$$K_n = A \cdot d, \quad (12)$$

где  $A$  – коэффициент, о.е.

Для определения коэффициентов полинома в выражении (11) и коэффициента в выражении (12) использовалась линейная аппроксимация и применялся инструмент *Curve Fitting Tool* прикладного пакета *MatLab*.

В аналитическом виде функции зависимости колебаний светового потока ламп от колебаний напряжения в цепи их питания представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Функции зависимости колебаний светового потока ламп от колебаний напряжения в цепи их питания

Тип и мощность ламп	$K_n = H(d, f_{кн})$
Накаливания 60 Вт	$(5,568 - 0,0016 \cdot f_{кн}) \cdot d$
Люминесцентная 40 Вт	$11 \cdot d$
Компактная люминесцентная 40 Вт	$2,022 \cdot d$
Индукционная 15 Вт	$1,134 \cdot d$
Светодиодная лампа 11 Вт	$0,1606 \cdot d$

Графическая интерпретация данных табл. 1 представлена на рис.8.

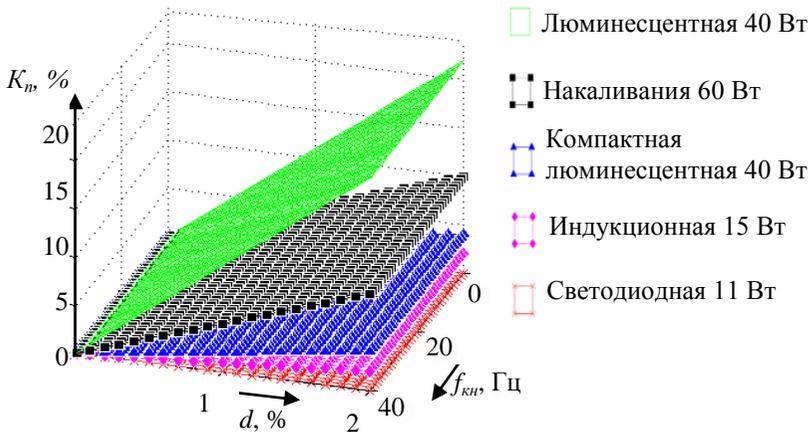


Рисунок 8 – Графическая интерпретация функций зависимости колебаний светового потока ламп от колебаний напряжения в цепи их питания

Из рис.8 видно, что при одинаковых колебаниях напряжения в электрической сети у люминесцентных ламп наблюдаются колебания светового потока с большими значениями  $K_n$ , чем у ламп накаливания. С другой стороны, при одинаковых колебаниях напряжения в электрической сети значения  $K_n$  светодиодных, компактных люминесцентных и индукционных ламп оказываются меньше, чем у ламп накаливания.

С помощью функций связи колебаний светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания (рис.8) по выражениям (5), (6) и (8) были рассчитаны НЧХП для ламп различных типов. Их графическая интерпретация представлена на рис.9.

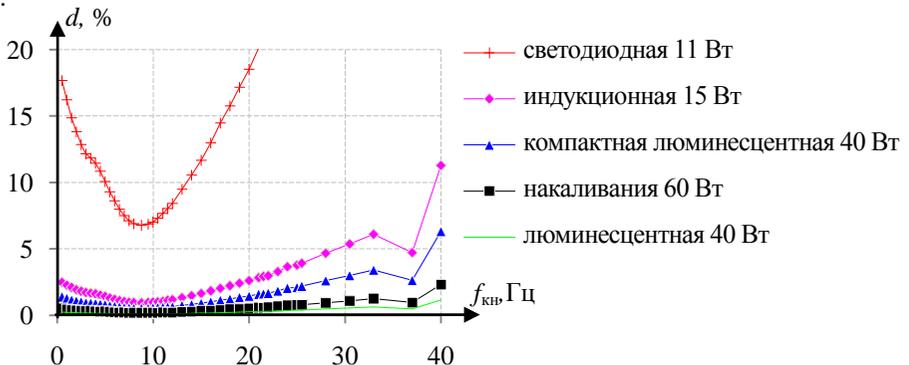


Рисунок 9 – Графическая интерпретация НЧХП для ламп различных типов

В соответствии с рис.9 НЧХП для люминесцентной лампы 40 Вт находится ниже характеристики лампы накаливания мощностью 60 Вт, и при одинаковых колебаниях напряжения уровень фликера у люминесцентных ламп будет значительно больше, чем у ламп накаливания. С другой стороны, НЧХП для

компактной люминесцентной лампы, а также характеристики индукционной и светодиодной ламп располагаются выше стандартной НЧХП. По этой причине для таких ламп характерны меньшие уровни фликера по сравнению с лампами накаливания.

В табл.2. представлены значения методической погрешности применения стандартных методов оценки фликера, вызванного колебаниями напряжения в электрической сети со следующими параметрами:  $d=0,199\%$  и  $f_{кн}=8,8$  Гц.

Таблица 2 – Методическая погрешность применения стандартных методов оценки фликера

Тип и мощность ламп	$P_{st}$ , о.е.	$P_{st}^j$ , о.е.	$Err$ , %
Люминесцентная 40 Вт	1	1,9806	49,51
Компактная люминесцентная 40 Вт		0,3641	-174,65
Индукционная 15 Вт		0,2042	-389,71
Светодиодная 11 Вт		0,0289	-3360

Величина методической погрешности, возникающей при оценке фликера ламп различных типов стандартными методами, определена по выражению

$$Err = \frac{P_{st}^j - P_{st}}{P_{st}} \cdot 100\% , \quad (13)$$

где  $P_{st}^j$  – фактическое значение кратковременной дозы фликера применяемой лампы;  $P_{st}$  – кратковременная доза фликера, определенная стандартными методами.

По данным табл.2 видно, что стандартными методами оценка фликера люминесцентных ламп мощностью 40 Вт может быть занижена почти в 2 раза, компактных люминесцентных ламп мощностью 40 Вт – завышена почти в 2 раза, индукционной лампы мощностью 15 Вт – завышена в 4 раза, светодиодных ламп мощностью 11 Вт – завышена почти в 30 раз.

Использование рассчитанных НЧХП позволит устранить методическую погрешность при оценке фликера ламп различных типов.

**В третьей главе** представлена усовершенствованная модель фликерметра.

Достоверная оценка фликера по данным, полученным с помощью фликерметра, может быть выполнена только в случае использования в его модели НЧХП, соответствующей применяемым лампам.

Реализация усовершенствованной модели фликерметра может быть осуществлена двумя способами:

- с использованием передаточной функции взвешивающего фильтра системы «лампа – глаз человека – мозг человека», соответствующей применяемым лампам;
- введением в модель фликерметра дополнительного блока поправки на тип применяемых ламп.

Второй вариант удобнее, поскольку подразумевает использование простых численных алгоритмов, реализуемых аппаратно с помощью недорогих микроконтроллеров.

Для усовершенствования стандартной модели фликерметра посредством введения в неё блока поправки должны использоваться НЧХП, рассчитанные по методике расчета НЧХП.

На рис.10 представлена структурная схема фликерметра, учитывающая тип применяемых ламп.

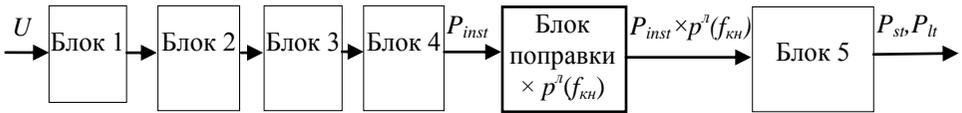


Рисунок 10 – Структурная схема фликерметра, учитывающая тип применяемых ламп

В соответствии с типом и мощностью применяемых ламп блоком поправки осуществляется умножение мгновенных значений фликера,  $P_{inst}$  на величину поправочного коэффициента, величина которого в реальном времени рассчитывается как

$$p^l(f_{kn}) = \frac{d_l(f_{kn})}{d_{лн}(f_{kn})}, \quad (14)$$

где  $d_l(f_{kn})$  – амплитуда относительных изменений напряжения НЧХП для применяемой лампы, %;  $d_{лн}(f_{kn})$  – амплитуда относительных изменений напряжения стандартной НЧХП.

Основной сложностью практического использования рассчитанных НЧХП является то, что они представлены в виде массива, состоящего из пар чисел,  $(f_{kни}, d_i)$ . Поэтому при колебаниях напряжения в электрической сети с частотой,  $f_{кн}^{эс}$ , величина которой соответствует промежуточным значениям НЧХП, корректировка значений  $P_{inst}$  затруднена.

На рис.11 представлена графическая интерпретация стандартной НЧХП и колебаний напряжения в электрической сети.



Рисунок 11 – Графическая интерпретация стандартной НЧХП и колебаний напряжения в электрической сети

Из рис.11 видно, что не представляется возможным определить соответствие колебаний напряжения в электрической сети параметрам НЧХП:  $f_{кни}, f_{кни+1}$  и  $d_i, d_{i+1}$ .

Описание всех рассчитанных НЧХП аналитическим способом позволяет в реальном времени выполнять корректировку значений  $P_{inst}$  во всем частотном диапазоне колебаний напряжения.

Аналитическое описание рассчитанных НЧХП для ламп различных типов может быть выполнено простым функциональным средством *Basic Fitting* прикладного пакета программ *MatLab* по методике, включающей в себя в последовательное выполнение следующих процедур:

1. Аппроксимация кривой НЧХП функцией, с асимптотическим графиком,  $d_i(f_{kn})$ . Асимптотический график наблюдается у функции следующего вида

$$d(f_{кн}) = \frac{A}{(B + f_{кн})^2 + C}, \quad (15)$$

где  $A$  – коэффициент, %·Гц<sup>2</sup>;  $B$  – коэффициент, Гц;  $C$  – коэффициент, Гц<sup>2</sup>.

Выражение (15) удобно для применения в микроконтроллере, поскольку использует простейшие математические действия.

2. Расчет погрешности аппроксимации кривой НЧХП,  $e_i(f_{кн})$ .

Значения  $e_i(f_{кн})$  рассчитываются по следующему выражению

$$e_i(f_{кн}) = d(f_{кн}) - d_i(f_{кн}), \quad (16)$$

где  $d(f_{кн})$  – амплитуда относительных изменений напряжения исходной НЧХП, %;  $d_i(f_{кн})$  – амплитуда относительных изменений напряжения, восстановленная по результатам  $i$ -той аппроксимации, %.

3. Аппроксимация  $e_i(f_{кн})$  функцией вида (15).

4. Расчет погрешности последующей аппроксимации,  $e_{i+1}(f_{кн})$ .

Значения  $e_{i+1}(f_{кн})$  рассчитываются по следующему выражению

$$e_{i+1}(f_{кн}) = e_i(f_{кн}) - d_{i+1}(f_{кн}). \quad (17)$$

5. Проверка точности аналитического описания рассчитанной НЧХП.

Величина  $e_{i+1}(f_{кн})$  проверяется по условию

$$e_{i+1}(f_{кн}) < 0,5\%. \quad (18)$$

Процедуры 3 и 4 осуществляется до выполнения условия (18).

6. Описание исходной НЧХП суммой полученных функций выполняется по следующему выражению

$$d_{\Sigma}(f_{кн}) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{(B_i + f_{кн})^2 + C_i}, \quad (19)$$

где  $N$  – количество функций.

Количество функций, необходимых для описания исходной НЧХП, зависит от необходимой точности приближения. Чем выше требуемая точность аппроксимации, тем больше количество итераций.

Относительная погрешность аппроксимации НЧХП определена по следующему выражению

$$e(f_{кн}) = \left| \frac{d(f_{кн}) - d_{\Sigma}(f_{кн})}{d(f_{кн})} \right| \cdot 100\%. \quad (20)$$

В рамках данной работы заданная величина погрешности аппроксимации к НЧХП равна 0,5%.

Для аналитического описания с заданной точностью стандартной НЧХП и НЧХП люминесцентной, компактной люминесцентной лампы требуется не менее двадцати функций, индукционной лампы – четырнадцати функций, светодиодной лампы – восьми функций.

**В четвертой главе** отмечается, что нормализация фликера должна выполняться одним из следующих способов:

- заменой источников света на менее чувствительные к колебаниям напряжения в электрической сети лампы;
- снижением колебаний напряжения в электрической сети.

Из представленных способов выбирается экономически целесообразный.

Эффективность мероприятий по нормализации фликера оценивается по уровням фликера до и после проведения мероприятий. Такая оценка должна выполняться с

применением усовершенствованной модели фликерметра или стандартными методами совместно с применением поправочных коэффициентов, определенных по методике расчета НЧХП.

В результате сравнения способов нормализации фликера может оказаться экономически нецелесообразным проведение мероприятий по снижению колебаний напряжения в электрической сети. В этом случае должна производиться замена ламп, чувствительных к колебаниям напряжения в электрической сети, на менее чувствительные лампы.

Для нормализации фликера посредством замены ламп разработана методика, которая предполагает процедуры, выполняемые в следующем порядке:

1. Анализ состава применяемых ламп.

Из всего состава применяемых ламп выделяются группы источников света одного типа и мощности.

2. Расчет НЧХП для применяемых ламп.

По соответствующей методике производится расчет НЧХП для каждой выделенной группы источников света. НЧХП, полученные для дальнейшего использования в усовершенствованной модели фликерметра, описываются аналитически. Кроме этого, методика расчета НЧХП предполагает определение поправочных коэффициентов. Они используются для расчета уровня фликера по данным, полученным стандартными расчетными методами.

3. Определение уровней фликера.

Для каждой выделенной группы источников света определение значения  $P_{st}$  осуществляется одним из следующих способов:

- стандартными методами с применением поправочных коэффициентов, определенных по методике расчета НЧХП;
- применением усовершенствованной модели фликерметра.

4. Оценка фликера.

Выполняется проверка следующего условия

$$P_{st} < 1 \text{ о.е.} \quad (21)$$

В случае выполнения условия (21) замена источников света не требуется.

Если условие (21) не выполняется для всех групп источников света необходимо проведение мероприятий по снижению колебаний напряжения в электрической сети.

5. Замена ламп.

Лампы, принадлежащие группам источников света с выявленным превышением допустимого уровня фликера, необходимо заменить на лампы, у которых уровни фликера не превышают допустимые нормы.

Методика по нормализации фликера посредством замены ламп прошла была использована в электрической сети общежития санатория-профилактория БрГУ.

Результаты суточных измерений фликера, выполненных с помощью стандартного фликерметра, в электрической сети общежития показали наибольшее значение  $P_{st} = 1,7$  о.е.

В табл. 3 представлены результаты расчета фактических уровней фликера ламп различных типов.

Таблица 3 – Результаты расчета фактических уровней фликера

Тип и мощность ламп	$p^r$ , о.е.	$P_{st}$ , о.е.
Накаливания 60 Вт	1	1,7
Люминесцентная 40 Вт	1,97	3,35
Компактная люминесцентная 40 Вт	0,36	0,61
Индукционная 15 Вт	0,2	0,34
Светодиодная 11 Вт	0,03	0,05

По данным табл.3 видно превышение допустимой величины  $P_{st}=1$  о.е. у люминесцентных ламп и ламп накаливания. В этой связи произведена замена этих ламп на светодиодные в связи с тем, что у последних расчетный уровень фликера наименьший.

Расчетная оценка колебаний напряжения, вызванных работой электрической нагрузки в электрической сети, выполняется с допущением того, что колебания напряжения происходят с частотой, соответствующей точке минимума НЧХП применяемых ламп. Это допущение было использовано при *разработке методики по нормализации фликера на основе данных расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети*. Разработанная методика предполагает процедуры, выполняемые в следующем порядке:

1. Анализ состава применяемых ламп.
2. Расчет НЧХП для применяемых ламп.
3. Оценка фликера.

Выделяется группа ламп с наибольшим превышением уровня фликера,  $P_{stmax}$ . Выполняется оценка соответствия значений  $P_{stmax}$  действующим нормам.

В случае нахождения уровней фликера в пределах нормы проведение мероприятий по снижению колебаний напряжения в электрической сети не требуется.

4. Определение уровня колебаний напряжения, соответствующего точке минимума НЧХП выделенной группы ламп.

Например, при использовании ламп накаливания мощностью 60 Вт наименьшее значение амплитуды относительных изменений напряжения  $d_{min}$ , соответствующее точке минимума стандартной НЧХП, составляет 0,196%.

5. Расчет наибольшего значения амплитуды относительных изменений напряжения,  $d_{max}$ .

Расчет  $d_{max}$  выполняется по результатам использования стандартных методов, приведенных в *ГОСТ 30804.3.3-2013*.

6. Расчет отклонения  $d_{max}$  от  $d_{min}$ .

Расчет отклонения  $d_{max}$  от  $d_{min}$  производится по следующему выражению

$$\Delta d = d_{max} - d_{min}. \quad (22)$$

7. Проведение мероприятий по снижению колебаний напряжения в электрической сети.

Стандартные методы, приведенные в *ГОСТ 30804.3.3-2013*, из-за ряда допущений не позволяют учесть все факторы, влияющие на значения  $d_{max}$ . Поэтому после проведения мероприятий по снижению колебаний напряжения в электрической сети необходимо измерение  $d_{max}$ .

8. Измерение  $d_{max}$ .

Измерение  $d_{max}$  выполняется с помощью стандартного фликерметра.

9. Проверка эффективности проведенных мероприятий.

После проведения мероприятий нормализации фликера  $d_{max}$  не должна превышать минимального значения  $d_{min}$ .

В случае использования ламп накаливания мощностью 60 Вт должно выполняться следующее условие

$$d_{max} < d_{min}^{лн} = 0,196\% . \quad (23)$$

При использовании ламп различных типов наибольшая амплитуда относительных изменений напряжения не должна превышать

$$d_{max} < d_{min}^л = \frac{d_{min}^{лн}}{p^л} . \quad (24)$$

Если  $d_{max} > d_{min}$ , то по формуле (22) необходимо рассчитать  $\Delta d$  и провести другие мероприятия по снижению колебаний напряжения в электрической сети.

Методика по нормализации фликера на основе расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети была использована в системе электроснабжения (СЭС) административного корпуса металлургического завода ООО «Промышленная металлургия».

Измерения  $P_{st}$  в СЭС административного корпуса выполнены с помощью анализатора качества электрической энергии «Энергомонитор 3.3Т».

График измеренной  $P_{st}$  в СЭС административного корпуса завода представлен на рис.13.

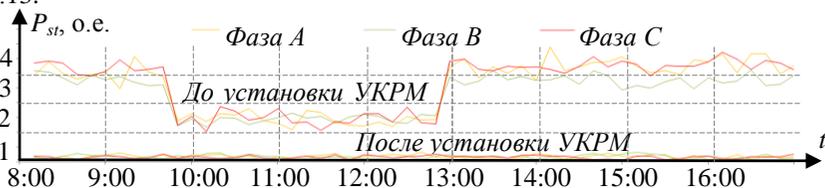


Рисунок 13 – График измеренной  $P_{st}$  в СЭС административного корпуса завода

В табл. 4 представлены результаты расчета наибольших уровней фликера для ламп различных типов.

Таблица 4 – Результаты расчета наибольших уровней фликера для ламп различных типов

Тип и мощность ламп	$p^л$ , о.е.	$P_{st}$ , о.е.
Накаливания 60 Вт	1	3,9
Люминесцентная 40 Вт	1,97	7,68
Компактная люминесцентная 40 Вт	0,36	1,404
Индукционная 15 Вт	0,2	0,78
Светодиодная 11 Вт	0,03	0,117

Оценка фликера в электрической сети административного корпуса показала превышение нормируемого действующим стандартом уровня фликера у ламп накаливания, люминесцентных ламп и у компактных люминесцентных ламп.

По данным табл. 4 видно, что наибольший по уровню фликер наблюдался у люминесцентных ламп. Поэтому амплитуду относительных изменений напряжения,

соответствующую точке минимума НЧХП, определяли для этих ламп. Она составила  $d_{min}=0,099$  о.е.

В табл. 5 приведены результаты расчета  $\Delta d$ .

Таблица 5 – Результаты расчета  $\Delta d$

Тип и мощность ламп	$d_{max}, \%$	$d_{min}, \%$	$\Delta d, \%$
Накаливания 60 Вт	2,886	0,199	2,69
Люминесцентная 40 Вт		0,099	2,787
Компактная люминесцентная 40 Вт		0,538	2,348
Индукционная 15 Вт		0,95	1,926
Светодиодная 11 Вт		6,78	–

Для снижения колебаний напряжения в СЭС административного корпуса завода было предложено применение быстродействующих установок компенсации реактивной мощности (УКРМ).

Значения мощности УКРМ  $Q_k$ , необходимых для снижения колебаний напряжения в электрической сети при использовании ламп различных типов, приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Мощность УКРМ, необходимых для снижения колебаний напряжения в электрической сети при использовании ламп различных типов

Тип и мощность ламп	$Q_k, \text{кВар}$
Накаливания 60 Вт	500
Люминесцентная 40 Вт	550
Компактная люминесцентная 40 Вт	450
Индукционная 15 Вт	400
Светодиодная 11 Вт	0

Наиболее чувствительными к колебаниям напряжения в электрической сети являются люминесцентные лампы, поэтому к установке были приняты УКРМ мощностью 550 кВар типа УКРМ-Т-0,4-550.

После установки УКРМ  $d_{max}$  составила 0,09 %, что меньше требуемой для нормализации фликера люминесцентных ламп величины 0,099%. Кратковременная доза фликера у люминесцентных ламп после проведения мероприятий нормализации фликера составила 0,98 о.е., что не превышает допустимые действующими нормами значения 1 о.е.

Расчетная оценка колебаний напряжения в электрической сети стандартными методами предполагает допущения, из-за которых выбранные мероприятия по нормализации фликера могут оказаться неэффективными. Это может потребовать уточнения параметров снижения колебаний напряжения в эксплуатируемой электрической сети. Для выбора мероприятий в эксплуатируемой электрической сети разработана методика по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения. Она предполагает процедуры, выполняемые в следующем порядке:

1. Анализ состава применяемых ламп.
2. Расчет НЧХП для применяемых ламп.
3. Оценка фликера.



Методика по нормализации фликера на основе инструментальной оценки колебаний напряжения была использована в электрической сети студенческого городка БрГУ.

График измеренной  $P_{st}$  в электрической сети студенческого городка БрГУ представлен на рис.13.

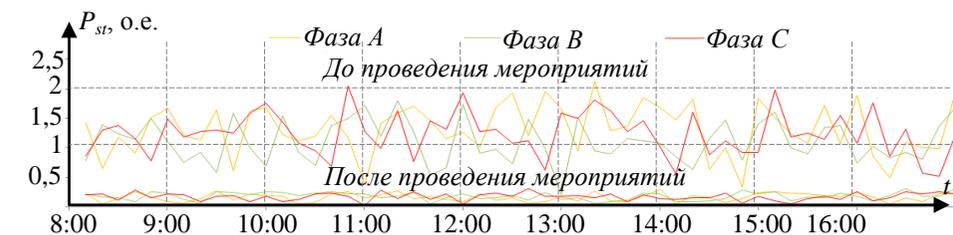


Рисунок 13 – Графическое изображение результатов измерения  $P_{st}$  электрической сети студенческого городка

В табл. 7 представлены результаты определения наибольших уровней фликера у ламп различных типов.

Таблица 7 – Результаты определения наибольших уровней фликера у ламп различных типов

Тип и мощность ламп	$p^2$ , о.е.	$P_{st}$ , о.е.
Накаливания 60 Вт	1	2,2
Люминесцентная 40 Вт	1,97	4,33
Компактная люминесцентная 40 Вт	0,36	1,32
Индукционная 15 Вт	0,2	0,44
Светодиодная 11 Вт	0,03	0,06

По данным табл.7 видно превышение нормируемого действующим стандартом уровня фликера у ламп накаливания, люминесцентных ламп и у компактных люминесцентных ламп. Наибольшее значение  $P_{st}$  наблюдалось у люминесцентных ламп. Оно составило 4,33 о.е. В этой связи пункты методики 7 и 8 должны были выполняться для этой группы ламп. Однако для сопоставления результатов использования методики, мероприятия, соответствующие пунктам 7 и 8, выполнялись и для других источников света.

Огибающая среднеквадратичных изменений напряжения электрической сети была записана с помощью цифрового осциллографа «OWON PS55022S». Её графическая интерпретация представлена на рис.14.

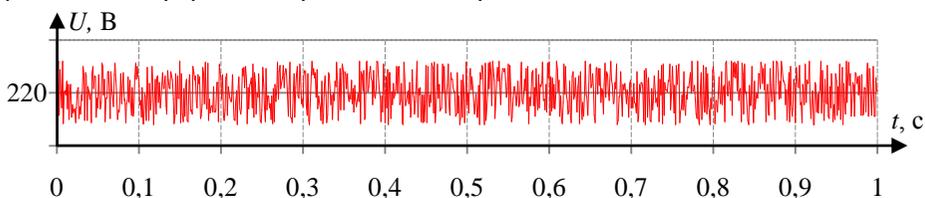


Рисунок 14 – Графическое изображение огибающей среднеквадратичных изменений напряжения

Графическое изображение результатов реализации пунктов методики 6÷8 для люминесцентных ламп мощностью 40 Вт представлено на рис.15.

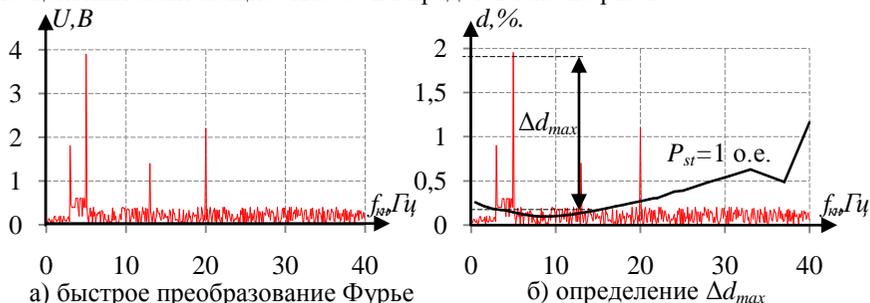


Рисунок 15 – Графическое изображение результатов спектрального анализа

Для снижения колебаний напряжения в электрической сети студенческого городка БрГУ была предложена установка УКРМ.

Необходимый уровень снижения колебаний напряжения в электрической сети и значения мощности УКРМ при использовании ламп различных типов определен по результатам расчетной и инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети. Их значения приведены в табл. 8 и табл. 9, соответственно.

Таблица 8 – Значения мощности УКРМ, определенные по результатам расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети

Тип и мощность ламп	$\Delta d, \%$	$Q_{кв}$ , кВар
Накаливания 60 Вт	1,701	200
Люминесцентная 40 Вт	1,801	225
Компактная люминесцентная 40 Вт	1,362	160
Индукционная 15 Вт	0,95	110
Светодиодная 11 Вт	-	-

Таблица 9 – Значения мощности УКРМ, определенные по результатам инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети

Тип и мощность ламп	$\Delta d, \%$	$Q_{кв}$ , кВар
Накаливания 60 Вт	1,61	190
Люминесцентная 40 Вт	1,753	200
Компактная люминесцентная 40 Вт	1,1	130
Индукционная 15 Вт	0,48	55
Светодиодная 11 Вт	-	-

По данным табл.8 и 9 видно, что мощность УКРМ, определенная по результатам расчетной оценки колебаний напряжения во всех случаях оказалась завышена. Наибольшее завышение мощности УКРМ соответствует применению индукционных ламп.

При использовании практически нечувствительных к колебаниям напряжения в электрической сети светодиодных ламп установка УКРМ не требовалась.

Наибольшая чувствительность к колебаниям напряжения выявлена у люминесцентных ламп, поэтому, в соответствии с табл.9, к установке были приняты УКРМ мощностью 200 кВар типа УКРМ-Т-0,4-200.

После установки УКРМ наибольшее значение  $P_{st}$ , зарегистрированное у люминесцентных ламп мощностью 40 Вт, составило 0,86 о.е, что подтверждают эффективность методики по нормализации фликера посредством инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

**В приложениях** представлены материалы разработки аппаратно-программного комплекса и патент на полезную модель «Аппаратный комплекс для определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера».

**В заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Колебания напряжения в электрической сети, вызванные работой оборудования с резкопеременным режимом работы, являются причиной возникновения фликера, уровень которого может значительно превышать допустимые нормы.

2. Показано, что оценка соответствия колебаний напряжения в электрической сети нормам качества электрической энергии выполняется по уровням фликера, моделируемым с помощью стандартной НЧХП, предполагающей использование ламп накаливания мощностью 60 Вт.

3. Использование стандартных методов для оценки соответствия колебаний напряжения в электрической сети нормам качества электрической энергии при использовании ламп различных типов не позволяет обеспечить требуемую точность определения уровней фликера. Методическая погрешность, возникающая при моделировании уровней фликера, превышает допустимые действующими нормами значения.

4. Повышение точности стандартных методов оценки фликера может быть обеспечено с помощью НЧХП ламп различных типов, позволяющих уменьшить разницу между моделируемыми и реальными уровнями фликера до допустимых действующими нормами значений. Для расчета параметров НЧХП для ламп различных типов необходима разработка соответствующей методики.

5. Расчет параметров НЧХП для ламп различных типов должен осуществляться с учетом связи реальных уровней фликера с колебаниями напряжения в электрической сети. Это требует разработки аппаратного обеспечения, позволяющего выполнять регистрацию колебаний светового потока ламп при заданных параметрах колебаний напряжения непосредственно в цепи их питания.

6. Разработана методика расчета параметров НЧХП для ламп различных типов.

7. Выполнена регистрация колебаний светового потока ламп при заданных параметрах колебаний напряжения непосредственно в цепи их питания с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса.

8. Наибольшая чувствительность к колебаниям напряжения в электрической сети выявлена у люминесцентных ламп. Моделируемые стандартными методами уровни фликера оказываются заниженными почти в 2 раза. У компактных люминесцентных, индукционных и светодиодных ламп чувствительность гораздо ниже. В случаях использования ламп этих типов уровни фликера, моделируемые стандартными методами, оказываются завышены в 2, 4 и более чем в 30 раз, соответственно.

9. Выявлена зависимость погрешности, вносимой аппаратно-программным комплексом в результаты измерений, от чувствительности к колебаниям напряжения в электрической сети применяемых ламп.

10. Структурная модель фликерметра дополнена блоком поправки, который с помощью стандартной НЧХП и НЧХП для применяемых ламп выполняет расчет значений поправочного коэффициента в реальном времени.

11. Аналитическое описание рассчитанных НЧХП выполнено методом последовательных приближений.

12. Для аналитического описания с заданной точностью стандартной НЧХП и НЧХП для люминесцентной, компактной люминесцентной лампы требуется не менее двадцати функций, индукционной лампы – четырнадцать функций, светодиодной лампы – восьми функций.

13. Выбор мероприятий по нормализации фликера должен осуществляться одним из двух способов:

- заменой источников света на менее чувствительные к колебаниям напряжения в электрической сети лампы;

- снижением колебаний напряжения в электрической сети.

14. Разработаны методики по нормализации фликера. Экспериментальные исследования, в электрической сети общежития санатория-профилактория БрГУ, СЭС административного корпуса металлургического завода ООО «Промышленная металлургия», в электрической сети студенческого городка БрГУ, показали их высокую эффективность. Исследования показали, что при использовании методики по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети наилучший результат достигается для случаев, когда параметры колебаний напряжения в электрической сети близки к параметрам НЧХП, по которой производится определение требуемого уровня снижения колебаний напряжения.

Анализ полученных результатов позволил определить направления дальнейших исследований:

1. Сбор статистической информации для определения НЧХП для комбинаций ламп различных типов.

2. Разработка аппаратного обеспечения для оперативного получения поправочных коэффициентов оценки фликера ламп различных типов.

3. Совершенствование существующей стандартной модели фликерметра средствами оптической оценки фликера для экспресс-оценки корректности применения поправочных коэффициентов.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

*В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации, для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук*

1. Лисицкий, К.Е. Разработка метода оценки погрешности нормативных способов измерения фликера при использовании альтернативных источников света / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Системы. Методы. Технологии.–2010.–№7. – С.91–94.
2. Лисицкий, К.Е. Разработка аппаратного обеспечения для определения передаточных функций альтернативных источников света при оценке дозы фликера / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Системы. Методы. Технологии.–2012. –№1(13). –С.98–101.
3. Лисицкий, К.Е. Адаптация цифровых фликерметров к оценке дозы фликера альтернативных источников света/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк А.В. // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – №3(19). – С.121–124.
4. Лисицкий, К.Е. Усовершенствование стандартной модели фликерметра для оценки дозы фликера в сетях общего назначения / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Технологии ЭМС. – 2014. –№1(48).–С.10–15.
5. Лисицкий, К.Е. Выбор средств уменьшения кратковременной дозы фликера при использовании энергосберегающих ламп / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк, М.А. Балаев// Системы. Методы. Технологии. –2015. –№1(25). – С.113–116.

### *Патенты РФ*

6. Аппаратный комплекс для определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера: пат. 119892 Рос. Федерация: МПК G 01 R 23/00/ Лисицкий К.Е., Струмеляк А.В.; заявитель и правообладатель Братск, ФГБОУ ВПО «БрГУ».– № 2011149905; заявл. 07.12.11, опубл. 27.08.12, Бюл.№ 24.

### *Другие издания*

7. Лисицкий, К.Е. Анализ проблемы колебаний напряжения в электрических сетях/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Матер. Регион. науч.-техн. конф. «Энергетике региона». – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С.208–211.
8. Лисицкий, К.Е. Моделирование цифрового комплекса для оценки дозы фликера в электрических сетях общего назначения / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Матер.VIII (XXX) Всерос. науч.-техн. конф. (19-23 апреля 2010 г.) . – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 78.
9. Лисицкий, К.Е. Моделирование цифрового фликерметра для оценки дозы фликера в электрических сетях общего назначения / К.Е. Лисицкий // Труды Братского Государственного Университета: сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2т. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – Т.2. – С. 15–21.
10. Лисицкий, К.Е. Аппаратное решение проблемы оценки дозы фликера источников света / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк // Матер.X (XXXII) Всерос. науч.- техн. конф. (18-22 апреля 2011 г.) . – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2011. – С. 64–65.

11. Лисицкий, К.Е. Аппаратное решение проблемы определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяляк // Труды Братского Государственного Университета: сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2т. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2011. – Т.2. – С. 31–35.
12. Лисицкий, К.Е. Аппаратное решение задачи адаптации современных цифровых фликерметров / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяляк // Труды Всерос. науч.- практ. конф.: Братская ГЭС: история строительства, опыт эксплуатации, перспективы. – Братск: Братск. Госуд. ун-т., 2011. – С. 119–123.
13. Лисицкий, К.Е. Разработка программируемого источника питания 220 В / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяляк // Труды Всерос. науч.- практ. конф.: Братская ГЭС: история строительства, опыт эксплуатации, перспективы. – Братск: Братск. Госуд. ун-т., 2011. – С. 146–147.
14. Лисицкий, К.Е. Усовершенствованная модель фликерметра / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяляк // Энергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 393–397.
15. Лисицкий, К.Е. Метод оценки дозы фликера, учитывающий тип источника света/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяляк // Труды БРГУ, Серия: Естественные и инженерные науки. – Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2014.-Т1. –С.63–68.
16. Лисицкий, К.Е. Совершенствование метода оценки фликера / К.Е. Лисицкий // Системные исследования в энергетике / Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып.44. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. –С.50–55.
17. Лисицкий, К.Е. Усовершенствованный метод оценки фликера в электрической сети / К.Е. Лисицкий // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы XIII (XXXV) Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014. –С.50–51.
18. Лисицкий, К.Е. Выбор мероприятия для снижения фликера и оценка их эффективности / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяляк, К.С. Никифоров // Управление качеством энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции (Москва, 26-28 ноября 2014 г.) – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. – С.123–128.
19. Лисицкий, К.Е. Определение параметров снижения колебаний напряжения в электрической сети для борьбы с фликером / К.Е. Лисицкий, Д.С. Дружинина, Э.Ф. Файзуллин // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: Сб. статей всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление», 1-3 сентября 2015, г. Иркутск, Россия. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С.251–255.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130  
Заказ №39, тираж 100 экз.