

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Братский государственный университет»



На правах рукописи

**Лисицкий Константин Евгеньевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФЛИКЕРА В  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

кандидат технических наук

Струмеляк Анатолий Владимирович

Братск 2017

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

	стр.
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФЛИКЕРА .....	14
1.1. Проблема применения кривых допустимых колебаний напряжения .....	17
1.2. Нормы фликера и методы его оценки .....	21
1.2.1. Аналитические методы оценки фликера .....	23
1.2.2. Метод непосредственных измерений кратковременной дозы фликера .....	34
1.2.3. Метод моделирования при оценке фликера .....	38
1.3. Методическая погрешность, вносимая в результаты оценки фликера стандартными методами .....	39
1.4. Мероприятия по нормализации фликера посредством снижения колебаний напряжения в электрической сети .....	41
1.5. Выводы к главе 1 .....	46
ГЛАВА 2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФЛИКЕРА .....	48
2.1. Методика расчета нормализованной частотной характеристики прибора .....	51
2.2. Аппаратное обеспечение для исследований связи колебаний светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания .....	54
2.3. Применение аппаратно-программного комплекса и анализ полученных экспериментальных данных .....	57
2.4. Оценка погрешности измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса .....	77
2.5. Выводы к главе 2 .....	82

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ФЛИКЕРМЕТРА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ТИП ПРИМЕНЯЕМЫХ ЛАМП .....	84
3.1. Усовершенствованная модель фликерметра .....	85
3.2. Аналитическое описание рассчитанных нормализованных частотных характеристик прибора .....	86
3.3. Выводы к главе 3 .....	101
ГЛАВА 4. ВЫБОР МЕРОПРИЯТИЙ ПО НОРМАЛИЗАЦИИ ФЛИКЕРА .....	102
4.1. Мероприятия по нормализации фликера посредством замены ламп .....	102
4.2. Нормализация фликера посредством снижения колебаний напряжения в электрической сети .....	106
4.2.1. Методика по нормализации фликера на основе данных расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети .....	106
4.2.2. Методика по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети .....	115
4.3. Выводы к главе 4 .....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	125
ЛИТЕРАТУРА .....	128
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	140
Приложение 1. Разработка аппаратной части аппаратно-программного комплекса.....	140
Приложение 2. Патент на полезную модель №119892 .....	144

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;

НЧХП – нормализованная частотная характеристика прибора;

СТК – статический тиристорный компенсатор;

СЭС – системы электроснабжения;

УКРМ – устройство компенсации реактивной мощности;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

## ВВЕДЕНИЕ

### 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 [1]. К примеру, если у лампы накаливания снизить напряжение питания, то яркость её 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 [2].

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 10 мин., и длительной дозы фликера  $P_{lt}$  – меры фликера, оцениваемой в течение двух часов по последовательным значениям  $P_{st}$  [3]. 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 проблемы**

Первые работы, в которых упоминается фликер, опубликованы в начале XX века американскими учеными *Г. Айвсом* [4] и *И. Лэнгмюром* [5]. 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 [6], который в 1969 г. был переиздан в виде стандарта [7]. Кривые фликера стали прототипом кривых допустимых колебаний напряжения отечественного

стандарта [1], которые в настоящее время используются в расчетных методах оценки фликера [8].

Значительный вклад в сферу инструментальной оценки фликера внесли ученые *Dzn Lange, C. Rashbass, C. Mirra, G. Sani* и др. [9÷12]. 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 [13], а в 1997 году вступил в силу стандарт, установивший функциональные и конструктивные требования к фликерметрам [14]. 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 мощностью 60 Вт уровень фликера  $P_{st}=1$  о.е. В стандарте [13] 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 [15].

В отечественных стандартах, устанавливающих нормы качества электрической энергии 1967 г. [16] и 1987 г. [17], 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 [18, 19]. В последующих отечественных нормах электрической энергии [1] были приведены расчетные методы оценки фликера.

В настоящее время основные положения действующих отечественных стандартов [3, 8, 20÷22] заимствованы из зарубежных стандартов [23÷28]. 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 получения НЧХП ламп различных типов для последующего использования полученных НЧХП при оценке фликера и выбора мероприятий по его нормализации.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационное исследование соответствует паспорту 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 значениями 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.

**Предметами исследования** являются 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 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 в 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 ламп различных типов предложены для внесения в ГОСТ Р 51317.4.15.

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 ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» (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.

Получен патент на полезную модель №119892 от 07.11.12 г. «Аппаратный комплекс для определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера».

**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 степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получен 1 патент РФ.

**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.

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

**В первой главе** приведены нормы фликера в электрических сетях. Выполнен обзор существующих методов оценки фликера. Выявлена причина происхождения методической погрешности, возникающей при оценке фликера ламп различных типов стандартными методами. Отмечена необходимость в совершенствовании стандартных методов оценки фликера. Приведен обзор мероприятий по нормализации фликера, выполняемых путем снижения колебаний напряжения в электрической сети. Отмечена необходимость учета чувствительности применяемых ламп к колебаниям напряжения при выборе мероприятий по нормализации фликера.

**Во второй главе** представлена разработанная методика расчета НЧХП. Дано описание аппаратно-программного комплекса. Выполнен обзор ламп различных типов, выявлены достоинства и недостатки их применения. Приведены результаты измерений, полученных с помощью аппаратно-программного комплекса, проведен их анализ. Проанализированы параметры рассчитанных

НЧХП ламп различных типов. Проведена оценка влияния типа ламп на величину методической погрешности, возникающей при использовании стандартных методов оценки фликера. Описана процедура оценки погрешности, вносимой аппаратно-программным комплексом в результаты измерений.

**В третьей главе** дано описание усовершенствованной модели фликерметра. Представлен порядок аналитического описания НЧХП. Приведены результаты оценки точности аналитического описания рассчитанных НЧХП.

**В четвертой главе.** Предложена методика по нормализации фликера посредством замены ламп. Разработаны методики по нормализации фликера на основе данных расчетной и инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети. Приведены примеры использования разработанных методик и результаты оценки фликера после их реализации.

**В заключении** представлены основные результаты работы и указаны направления дальнейших исследований.

**В приложениях** приведены материалы разработки аппаратно-программного комплекса и патент на полезную модель №119892 «Аппаратный комплекс для определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера».

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФЛИКЕРА

Работа электрического оборудования с циклически изменяющимся током, протекающим по полному сопротивлению сети  $r+jx$ , приводит к возникновению потерь напряжения в электрической сети  $\Delta U$  [29÷42].

Диаграмма векторов тока и напряжений при подключении нагрузки к электрической сети представлены на рисунке 1.1.

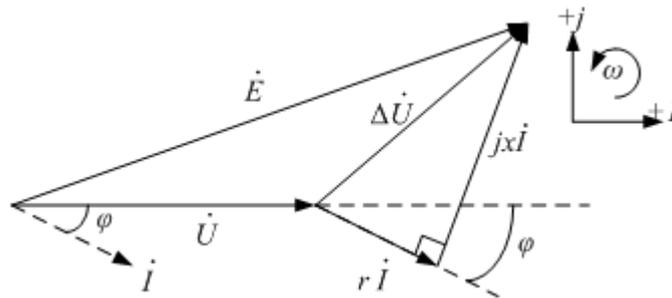


Рисунок 1.1 – Диаграмма векторов тока и напряжений при подключении нагрузки к электрической сети

При малых значениях угла между электродвижущей силой источника  $\dot{E}$  и напряжением приемника электрической энергии  $\dot{U}$  потери напряжения в электрической сети определяют по следующему выражению [19]:

$$\Delta \dot{U} = \dot{E} - \dot{U} = r \cdot \dot{I} \cdot \cos \varphi + jx \cdot \dot{I} \cdot \sin \varphi, \quad (1.1)$$

где  $r$  – полное активное сопротивление питающей сети, Ом;  $I$  – номинальный ток нагрузки, А;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки, о.е.;  $x$  – полное реактивное сопротивление сети, Ом.

Активную,  $P$  и реактивную,  $Q$  электрические нагрузки при номинальном напряжении  $U$  определяют как [40]

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi; \quad (1.2)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (1.3)$$

Продольную составляющую потерь напряжения,  $\Delta U$  рассчитывают по выражению

$$\Delta U = \frac{r \cdot P + x \cdot Q}{U}. \quad (1.4)$$

В процентах от номинального напряжения величину потерь напряжения,  $\Delta U_{\%}$  определяют по выражению

$$\Delta U_{\%} = \frac{r \cdot P + x \cdot Q}{U^2} \cdot 100\% . \quad (1.5)$$

В высоковольтных установках величина активного сопротивления,  $r$  значительно меньше индуктивного сопротивления,  $x$ . Поэтому в расчетах потерь напряжения в высоковольтных электрических сетях величиной  $r$  пренебрегают.

Величину амплитуды относительных изменений напряжения в высоковольтных электрических сетях можно определить по выражению

$$d = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% \approx \frac{x \cdot Q}{U^2} \cdot 100\% = \frac{Q}{S_{кз}} \cdot 100\% , \quad (1.6)$$

где  $S_{кз}$  – мощность короткого замыкания источника питания, МВА.

В низковольтных установках величина активного сопротивления  $r$  элементов обычно сопоставима со значением индуктивного  $x$ , поэтому в практических расчетах колебаний напряжения в выражении (1.4) следует учитывать как активную так и реактивную составляющие мощности.

Источниками колебаний напряжения в большинстве случаев являются потребители с резкопеременным режимом работы, который характеризуется быстрыми изменениями активной и реактивной мощностей.

К таким потребителям относятся: привод реверсивных прокатных станов, управляемые вентильные преобразователи с широким диапазоном и большой скоростью регулирования напряжения, дуговые сталеплавильные печи, мощные сварочные агрегаты [43].

Колебания напряжения в электрической сети приводят к серьёзным негативным последствиям [32], а именно:

- ухудшению качества работы телевизионных приемников;
- нарушению работы рентгеновского оборудования;

- ложной работе регулирующих устройств и электронных вычислительных машин;
- нарушению в работе преобразователей;
- колебаниям момента на валу вращающихся машин, вызывающим дополнительные потери электроэнергии и увеличенный износ оборудования, а также нарушения технологических процессов, требующих стабильной скорости вращения;
- изменению яркости свечения ламп, приводящему к визуальному явлению, называемому фликер.

Формальное определение фликера – ощущение неустойчивости зрительного восприятия, вызванное световым источником, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени [44]. Небольшой уровень мерцаний может быть приемлемым, но если он выше определённого уровня, то начинает восприниматься человеком. Степень восприятия быстро растёт с увеличением амплитуды колебаний напряжения в электрической сети. При определённых частотах повторения колебаний напряжения даже малые их амплитуды могут быть заметными.

Мерцания ламп, воспринимаемые человеком, имеют определённую частоту. Изменения яркости свечения ламп с частотой более 40 Гц не воспринимаются из-за инертности человеческого глаза. Для частот менее 0,05 Гц колебания светового потока ламп не воспринимаются в силу того, что человеческий зрачок может адаптироваться к ним [11]. Исследования [4] показали, что наибольшие неудобства возникают при частоте мерцаний 8,8 Гц.

Оценка освещения в помещениях выполняется по значениям коэффициента пульсации освещённости [45÷47] при регистрации изменений яркости световых источников как в диапазоне частот 0,05÷40 Гц, так и вне него. Оценка фликера – изменений яркости световых источников, воспринимаемых человеческим глазом, выполняется по значениям  $P_{st}$  и  $P_{lt}$  [8]. В соответствии с действующими нормами качества электрической энергии [20] оценка колебаний напряжения в электрической сети выполняется по этим двум параметрам, которые, в отличие от

остальных показателей качества электрической энергии, показывают степень воздействия нарушенного качества электрической энергии на человека.

Влияние фликера на людей зависит не только от индивидуального восприятия данного явления человеком, но и от технических аспектов, например, характеристик ламп, которые подвергаются воздействию колебаний напряжения в электрической сети [48].

### 1.1. Проблема применения кривых допустимых колебаний напряжения

Основой для оценки фликера является характеристика изменений напряжения на зажимах потребителя (см. рисунок 1.2). При этом определяется разность напряжений между двумя последовательными значениями огибающей среднеквадратичных значений фазных напряжений  $U(t_1)$  и  $U(t_2)$  в соответствующие им моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  [8, 18, 19, 25], которые могут быть измерены или рассчитаны по выражению

$$\Delta U = U(t_1) - U(t_2). \quad (1.7)$$

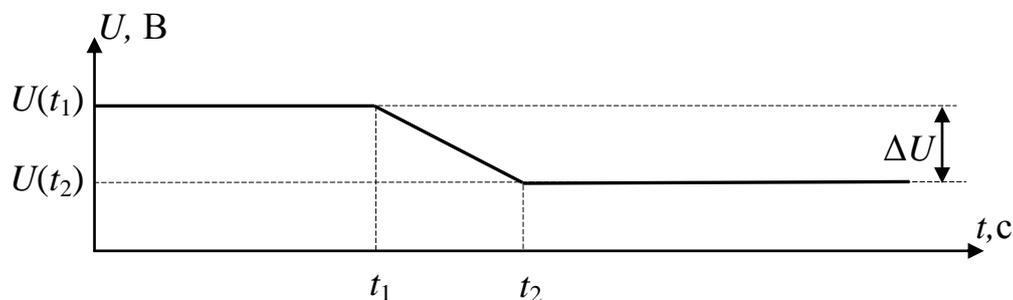


Рисунок 1.2 – Характеристика изменений напряжения на зажимах потребителя

Одним из параметров колебаний напряжения, в соответствии с [1], является размах изменения напряжения  $\delta U_i$  – величина, равная отношению разности между амплитудными или действующими значениями напряжения до  $U(t_1)$  и после  $U(t_2)$  одиночного изменения напряжения [49].

Величину размаха изменений напряжения,  $\delta U_t$  определяют по следующему выражению [1]:

$$\delta U_t = \frac{U(t_1) - U(t_2)}{U_{ном}} \cdot 100\% , \quad (1.8)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение электрической сети, В.

В рекомендациях по контролю гармоник в электроэнергетических системах [2], рекомендациях по производству и распределению электроэнергии на промышленных предприятиях [7] и нормах качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения [1] представлены допустимые значения  $\delta U_t$  в точках общего присоединения к электрическим сетям в зависимости от их частоты  $f_{кн}$  при изменениях напряжения прямоугольной формы (см. рисунок 1.3).

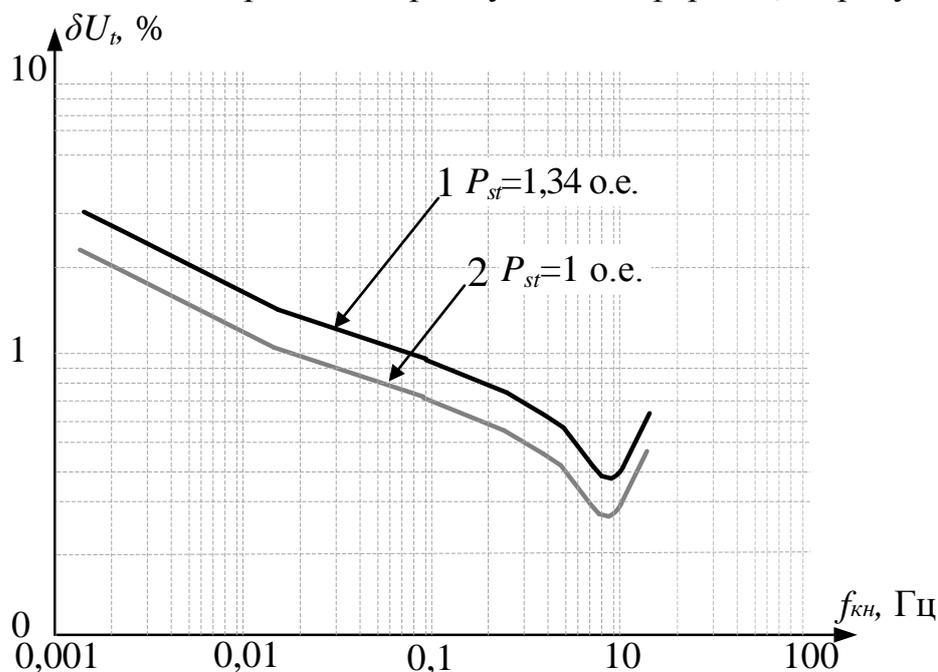


Рисунок 1.3 – Кривые допустимых колебаний напряжения:

- 1 – кривая, ограничивающая порог раздражения фликера;
- 2 – кривая, ограничивающая порог восприятия фликера

Кривая 1, показанная на рисунке 1.3, ограничивает порог раздражения фликера, под которым понимают максимальную величину изменений яркости световых источников, которая приводит к мерцаниям, ощущаемым без неудобства. Порогу раздражения фликера соответствует величина  $P_{st}=1,34$  о.е. [6]. В свою очередь, кривая 2 ограничивает порог восприятия фликера, под которым понимают [44] минимальную величину изменений яркости световых источников,

приводящую к осязательности мерцаний. Порогу восприятия фликера соответствует уровень  $P_{st}=1$  о.е. Аналитические методы оценки фликера, представленные в стандарте [8], используют кривую 2.

Кривые допустимых колебаний напряжения в стандартах [1, 2, 7] представлены на логарифмической шкале, поэтому их применение в инженерных расчетах затруднено.

В отечественных и зарубежных требованиях к фликерметрам [3, 28] представлена НЧХП, которая является аналогом кривой 2. Она ограничивает порог восприятия фликера, соответствующий  $P_{st}=1$  о.е. [6], и представлена в табличной форме – в виде зависимости амплитуды относительных изменений напряжения  $d$  от частоты возникновения этих изменений  $f_{кн}$ .

Амплитуду относительных изменений напряжения  $d$  определяют по аналогичному (1.8) выражению [8]:

$$d_i = \frac{U(t_1) - U(t_2)}{U_{ном}} \cdot 100\% . \quad (1.9)$$

На рисунке 1.4 приведено графическое изображение НЧХП для ламп накаливания мощностью 60 Вт [3].

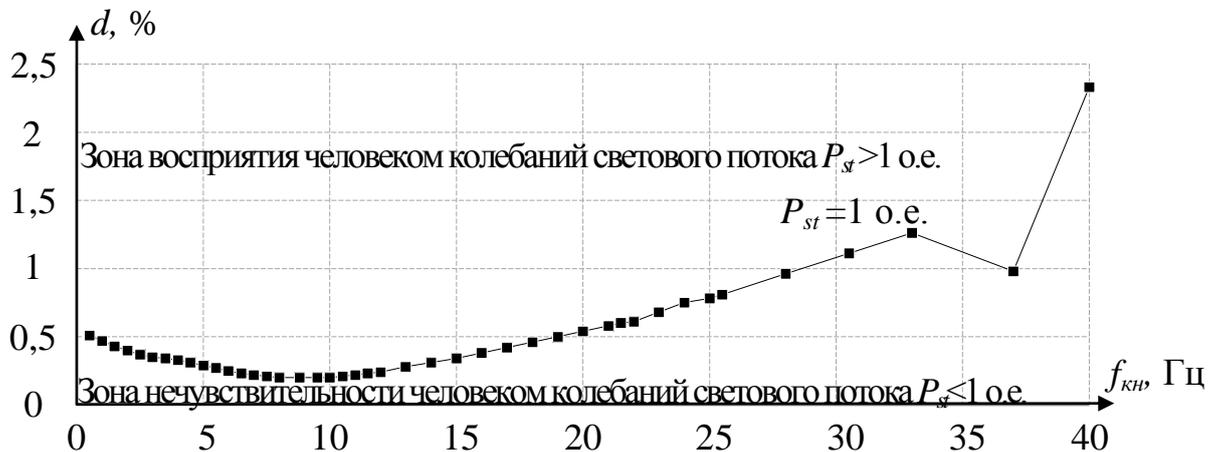


Рисунок 1.4 – Графическое изображение НЧХП

Область, расположенная выше НЧХП, соответствует зоне восприятия человеком колебаний светового потока ламп.

В общем случае НЧХП используется для калибровки фликерметров и косвенно для ограничения изменений напряжения, колебаний напряжения и

фликера, вызываемых оборудованием, подключаемым к электрическим сетям общего назначения [8].

Проблема применения кривых допустимых колебаний напряжения осложняется тем, что в настоящее время широкое распространение получили лампы, имеющие иной принцип действия, по сравнению с лампами накаливания. Это отличие обуславливает разницу в чувствительности таких ламп к колебаниям напряжения в электрической сети.

На рисунке 1.5 представлен график измеренного светового потока ламп различных типов при колебаниях напряжения одного уровня [50]. Из него видно,

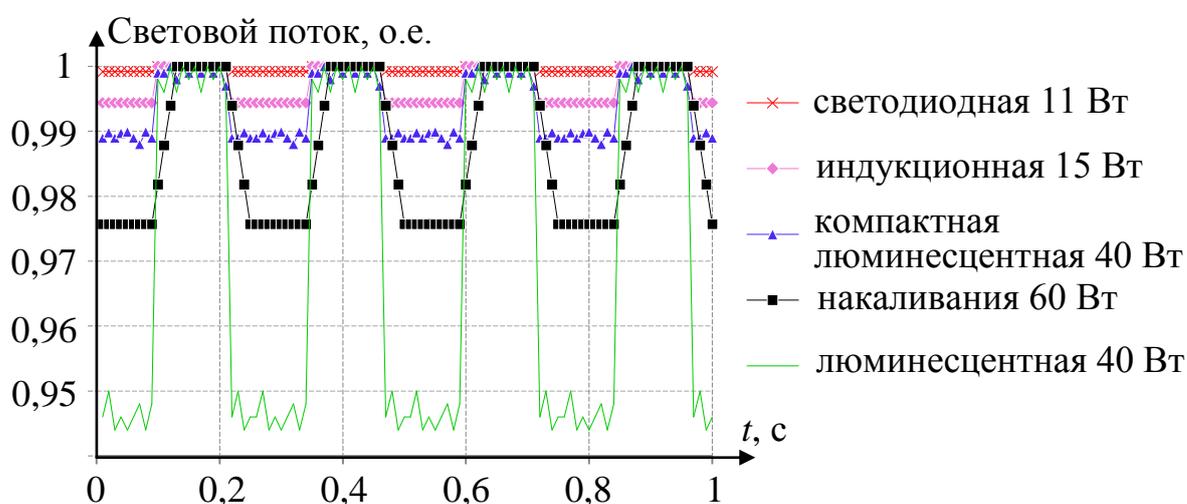


Рисунок 1.5 –График измеренного светового потока ламп различных типов при колебаниях напряжения одного уровня

что при одних и тех же колебаниях напряжения 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 значительнее. Поэтому при одинаковых колебаниях напряжения у люминесцентных ламп наблюдается больший, по сравнению с лампами накаливания, уровень фликера. И наоборот, при использовании 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.

При использовании стандартных методов уровни фликера моделируются по параметрам колебаний напряжения с помощью кривых допустимых колебаний

напряжения. При этом фактические уровни фликера не учитываются. Разница между фактическими и моделируемыми уровнями фликера обуславливает методическую погрешность, которая не позволяет использовать стандартные методы для оценки фликера ламп различных типов.

## 1.2. Нормы фликера и методы его оценки

Нормы фликера в низковольтных системах электроснабжения (СЭС) устанавливает стандарт [23], в соответствии с которым в точке передачи электроэнергии потребителям величина  $P_{st}$  не должна превышать значения 1 о.е.,  $P_{lt} - 0,8$  о.е.

В свою очередь, стандарт [24] устанавливает нормы фликера в СЭС, высокого и сверхвысокого напряжения (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1 – Нормы фликера в СЭС среднего, высокого и сверхвысокого напряжения

Доза фликера	Класс напряжения	
	средний	высокий, сверхвысокий
$P_{st}$ , о.е.	0,9	0,8
$P_{lt}$ , о.е.	0,7	0,6

К сожалению, стандарты [23, 24] на территории Российской Федерации не действуют и аналогов не имеют.

Отечественные нормы фликера представлены в стандартах [8, 20÷22].

Стандарт [20] устанавливает нормы фликера в точке передачи электроэнергии. В соответствии с ним  $P_{st}$  не должна превышать 1,38 о.е., а  $P_{lt}$  не должна превышать 1 о.е. Стандарты [8, 21, 22] устанавливают нормы фликера в точках общего присоединения потребителей электрической энергии, оснащенных лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение. В соответствии с ними, величина  $P_{st}$  не должна превышать 1 о.е., а  $P_{lt}$  не должна превышать 0,65 о.е. Эти нормы используются для ограничения

изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера, вызываемых оборудованием, подключаемым к электрическим сетям низковольтных СЭС общего назначения и оказывающим влияние на указанные СЭС.

В общем случае изменения напряжения,  $\Delta U$  обусловлены изменением тока нагрузки основной частоты,  $\Delta \dot{I}$ , который протекает по полному сопротивлению сети,  $\underline{z}$  [18, 19, 51, 52] и представляет собой сумму активной,  $\Delta I_a$  и реактивной,  $j\Delta I_r$  составляющих изменений комплексного тока.

Изменение тока нагрузки определяется по следующему выражению:

$$\Delta \dot{I} = \Delta I_a + j\Delta I_r. \quad (1.10)$$

Для однофазных и симметричных трехфазных электрических нагрузок изменения напряжения определяют по известному выражению

$$\Delta \dot{U} = |\Delta I_a r + j\Delta I_r x| \quad (1.11)$$

Значения  $\Delta U$  являются исходными данными для оценки фликера.

В настоящее время существует несколько методов оценки фликера. Основным из них является метод непосредственных измерений  $P_{st}$  [3]. Существуют альтернативные ему методы оценки фликера при колебаниях напряжения различного вида: аналитический метод, метод моделирования (см. таблицу 1.2) [8].

Таблица 1.2 –Методы оценки фликера

Вид колебаний напряжения в электрической сети	Метод оценки фликера
Произвольного вида (оценка on-line)	Метод непосредственных измерений $P_{st}$ (основной метод).
Произвольного вида, для которых определяют характеристику изменений напряжения $U(t)$	Метод моделирования; метод непосредственных измерений $P_{st}$ .
Огибающая изменений напряжения имеет наклонную, пилообразную, ступенчатую форму при частоте повторения меньше 1/с	Аналитический метод; метод моделирования; метод непосредственных измерений.
Огибающая изменений напряжения имеет форму меандра	Аналитический метод; метод моделирования.

Для колебаний напряжения произвольного вида оценка фликера может быть проведена методом непосредственных измерений  $P_{st}$  с использованием фликерметра. Этот метод является опорным для оценки электромагнитной совместимости потребителя электроэнергии со световыми источниками.

Для случаев, когда известна характеристика относительного изменения напряжения,  $U(t)$ , может быть применен метод моделирования.

Методы, представленные в таблице 1.2, не учитывают чувствительности к колебаниям напряжения применяемых ламп. Поэтому оценка фликера ламп различных типов выполняется с методической погрешностью.

### 1.2.1. Аналитические методы оценки фликера

Аналитические методы оценки фликера используются для расчета значений  $P_{st}$  и  $P_{lt}$  при проектировании электрических сетей с нагрузками, имеющими резкопеременный режим работы.

Аналитические методы предполагают определение амплитуды относительных изменений напряжения,  $d_o$  для колебаний напряжения прямоугольной формы, при которых наблюдаются такие же уровни фликера, что и при колебаниях напряжения различной формы. Для этого используют кривую допустимых колебаний напряжения, представленную на рисунке 1.6.

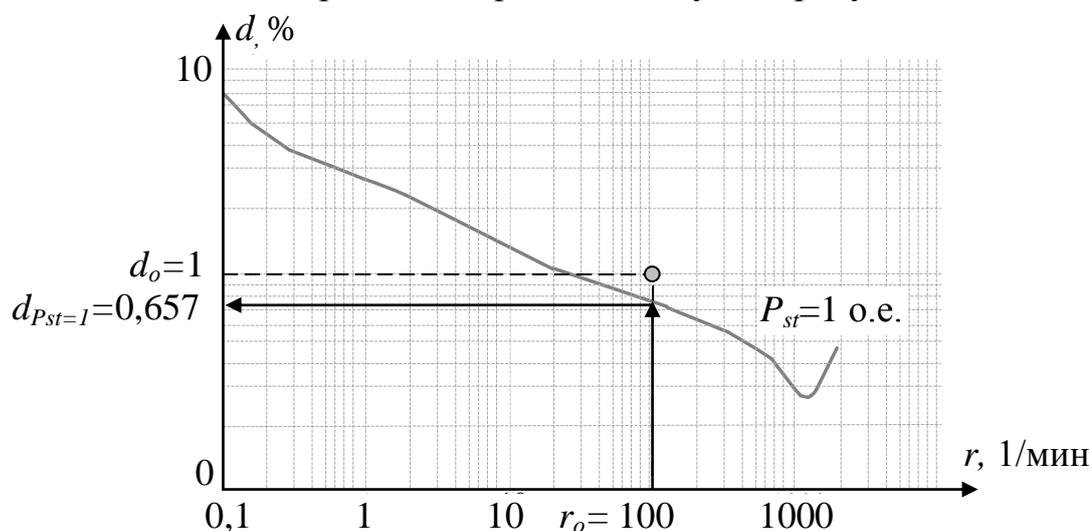


Рисунок 1.6 – Кривая допустимых колебаний напряжения

Если повторяющиеся прямоугольные колебания напряжения происходят с частотой  $r_0$  и амплитудой  $d_o$ , то значение  $P_{st}$  определяют как отношение амплитуды  $d_o$  к величине  $d_{P_{st}=1}$ , соответствующей ординате кривой допустимых колебаний напряжения, по следующему выражению

$$P_{st} = \frac{d_o}{d_{P_{st}=1}}. \quad (1.12)$$

Например, потребитель вызывает прямоугольные колебания напряжения в электрической сети с  $d=1\%$  и частотой  $r_0=100$  1/мин (см. рисунок 1.6). Амплитуда относительных изменений напряжения  $d_{P_{st}=1}$ , соответствующая ординате кривой допустимых колебаний напряжения, при такой частоте равна 0,657%. В соответствии с выражением (1.12) значение  $P_{st}$  составит

$$P_{sto} = \frac{1}{0,657} = 1,52 \text{ о.е.}$$

Для расчета  $P_{st}$  при повторяющихся колебаниях напряжения формы, отличной от прямоугольных, используют следующую зависимость [18, 19, 51, 52]:

$$P_{st} = 0,365 \cdot d \cdot F \cdot r^{0,31} \cdot R, \quad (1.13)$$

где  $d$  – амплитуда относительных изменений напряжения, %;  $F$  – коэффициент эквивалентности, зависящий от формы колебаний напряжения, о.е.;  $r$  – частота колебаний напряжения, 1/мин;  $R$  – коэффициент, зависящий от частоты колебаний напряжения, о.е.

Для этого же примера, если принять допущение, что  $R \approx 1$  о.е. (см. рисунок 1.7), то  $P_{st}$  может быть рассчитана по выражению (1.13):

$$P_{st} = 0,365 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 100^{0,31} \cdot 1 = 1,52 \text{ о.е.}$$

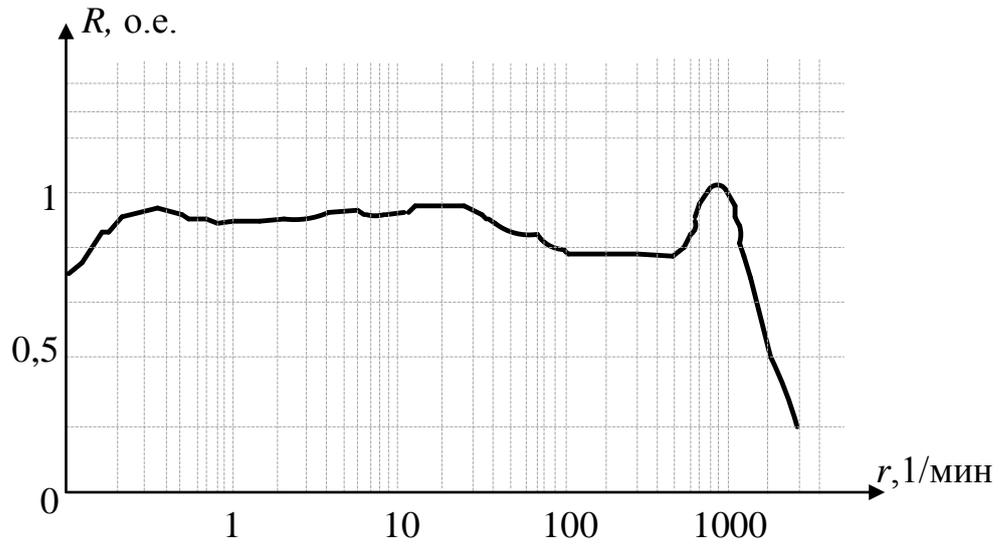


Рисунок 1.7 – Кривая зависимости коэффициента  $R$  от  $r$

В электрических сетях выделяют колебания напряжения нескольких видов. Характерные виды колебаний напряжения в электрической сети представлены на рисунке 1.8.

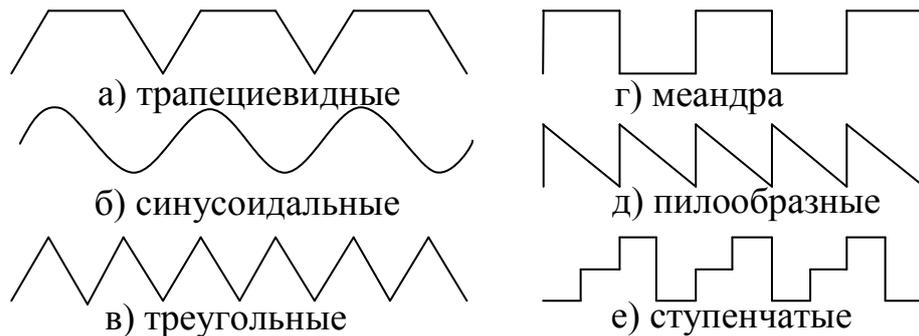


Рисунок 1.8 – Характерные виды колебаний напряжения

Основными видами возмущений, вызываемых циклично работающими нагрузками, являются прямоугольные колебания напряжения, имеющие коэффициент приведения  $F = 1$  о.е. Во всех остальных случаях при колебаниях напряжения другой формы можно полагать, что  $F < 1$  о.е.

Синусоидальные и треугольные колебания напряжения являются маловероятными. Они характерны для электродвигателей с циклически меняющейся механической нагрузкой. Коэффициент эквивалентности для таких колебаний напряжения определяют по рисунку.1.9.

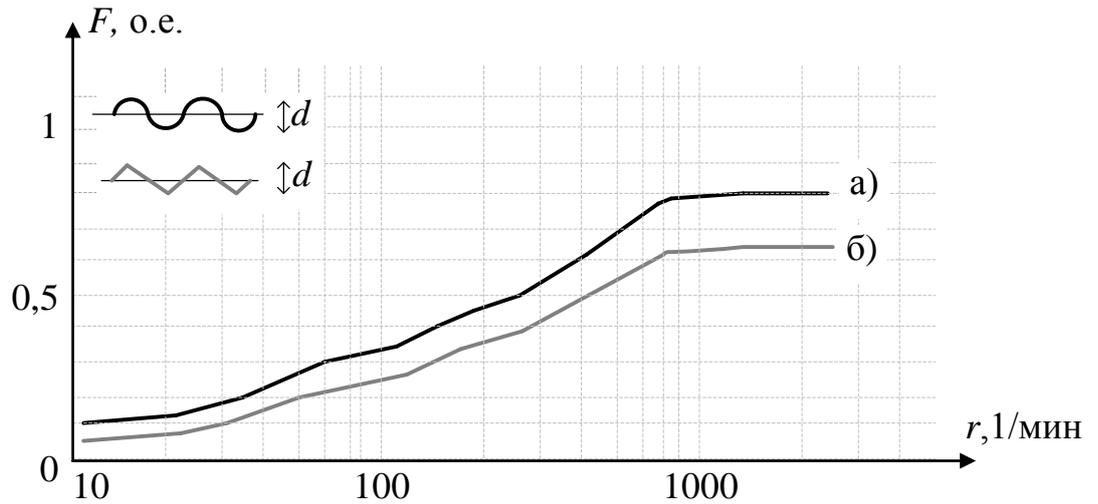


Рисунок 1.9 – Кривые коэффициента эквивалентности для синусоидальных (а) и треугольных колебаний напряжения (б)

Наклонные и ступенчатые колебания напряжения вызываются прокатными станами и электродвигателями, подключенными к тиристорным преобразователям. Коэффициент эквивалентности для таких колебаний напряжения определяется по рисунку 1.10.

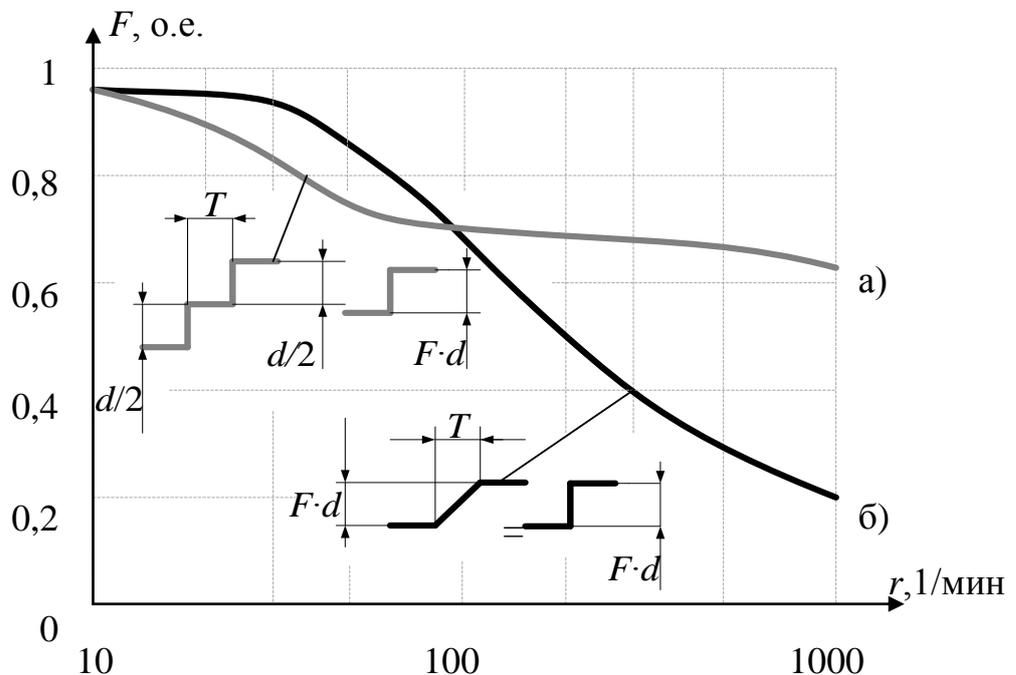


Рисунок 1.10 – Кривые коэффициента эквивалентности для ступенчатых (а) и наклонных колебаний напряжения (б)

Применение аналитического метода в реальной электрической сети затруднено, поскольку он не всегда позволяет определить принадлежность конкретных колебаний напряжения к тому или иному характерному виду. Также практически отсутствуют исследования по оценке погрешности данного метода при наличии в сети колебаний напряжения нескольких видов.

Расчет  $P_{st}$  в электрических сетях прокатных станков может производиться по упрощенной методике. В связи с незначительным влиянием колебаний напряжения наклонной формы на уровень фликера допустимо при расчетах учитывать колебаний напряжения только прямоугольной формы. В случае неперiodических колебаний напряжения для определения кратковременной дозы фликера рассматривается интервал времени  $T \leq 10$  мин.

Алгоритм расчета  $P_{st}$  состоит в следующем:

1. По выражению (1.9) рассчитывается амплитуда относительных изменений напряжения.
2. Определяется эквивалентная частота колебаний напряжения, в зависимости от длительности интервала  $T$ , мин, по выражению

$$r = \frac{1}{T}. \quad (1.14)$$

3. В соответствии с рисунком 1.6 по значению  $r$  определяется допустимая амплитуда изменений напряжения,  $d_0$  по уравнению

$$d_0 = f(r). \quad (1.15)$$

4. Производится расчет  $P_{st}$

$$P_{st} = \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^n d_i^3}}{d_0}. \quad (1.16)$$

Погрешность расчета  $P_{st}$  по приведенному алгоритму не превышает 10% [18].

Рабочий цикл электрической нагрузки, связанный с пусками двигателя и характеризуемый сериями повторяющихся импульсов, разделенных равными промежутками времени, может вызывать изменения напряжения в виде серий импульсов. При этом,  $P_{st}$  является функцией амплитуды, формы, частоты и числа импульсов серии, а также длительности серий и промежутков между ними.

Некоторые нагрузки создают в СЭС колебания напряжения импульсного типа с длительностью импульсов  $T < 500$  мс. Исследования [18] показали, что результирующий сигнал может быть преобразован в отдельный эквивалентный прямоугольный импульс с помощью применения коэффициентов эквивалентности. При импульсах с длительностью  $T \geq 500$  мс их влияние приблизительно такое же, как отдельных направленных вниз с длительностью  $T_1$  и вверх с длительностью  $T_2$  фронтов напряжений (см. рисунок 1.11).

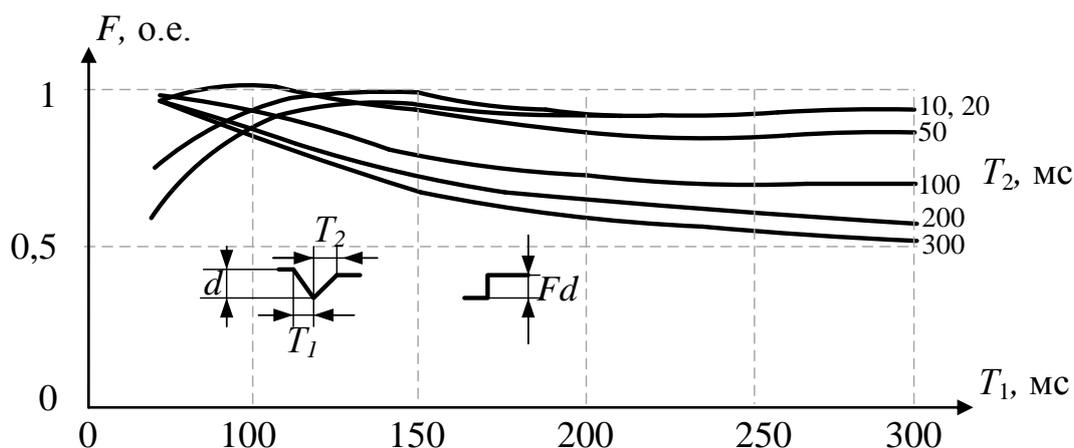


Рисунок 1.11 – Кривые коэффициента эквивалентности для колебаний напряжения при пусках двигателя

Наиболее неблагоприятной длительностью прямоугольного импульса является 65 мс. Коэффициент эквивалентности в этом случае равен 1,46 о.е. При длительности импульса менее 65 мс реагирование зрения человека на направленные вниз и обратные фронты уменьшается и, таким образом, влияние колебания напряжения на величину  $F$  также уменьшается.

Рабочий цикл, характеризуемый сериями повторяющихся импульсов, разделенных равными промежутками, может вызывать колебания напряжения в виде серий импульсов. При этом  $P_{st}$  является функцией амплитуды, формы, частоты и числа импульсов серии, а также длительности и промежутков между сериями. Кратковременная доза фликера может быть определена с помощью значений  $F$ , представленных на рисунке 1.12.

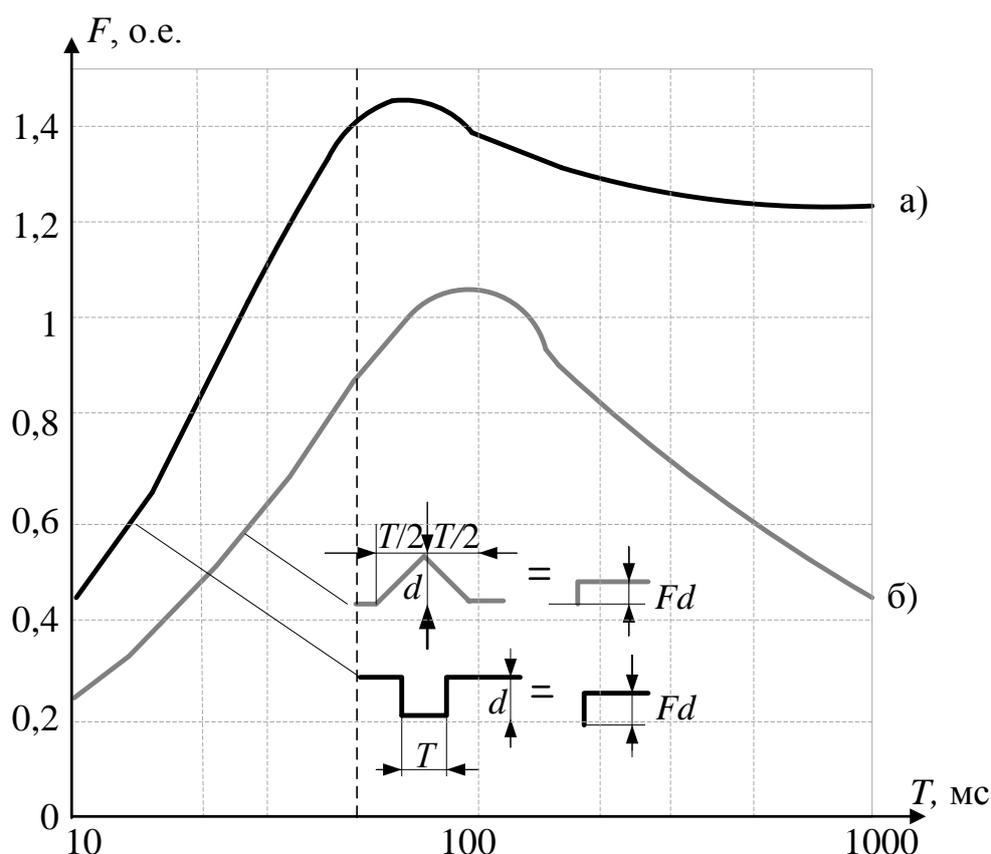


Рисунок 1.12 – Кривые коэффициента эквивалентности для треугольных (а) и прямоугольных (б) импульсов различной длительности

При оценке фликера, создаваемого отдельными некомпенсированными дуговыми сталеплавильными печами, учитывается длительность рабочего цикла этих печей [52÷54]. Кратковременная доза фликера в этом случае может изменяться от периода к периоду в течение 10 мин., как это показано на рисунке 1.13.

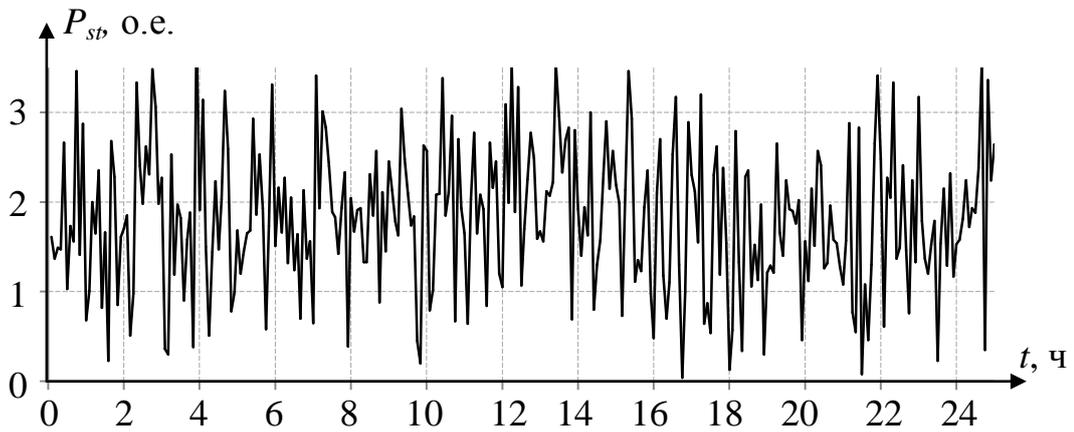


Рисунок 1.13 – Суточный график изменений кратковременной дозы фликера в электрической сети с дуговыми сталеплавильными печами

Для оценки фликера в узлах сетей с источником колебаний напряжения, имеющим известное значение  $P_{st}$ , можно воспользоваться методом коэффициента распределения напряжения [54÷56].

Данный подход предполагает, что элементы электрической сети имеют преимущественно индуктивный характер. Поэтому форма изменений напряжения в узлах высокого и низкого напряжения с высокой точностью соответствует форме изменений напряжения источника. В свою очередь, уровни фликера на участках изменяются пропорционально величине коэффициента передачи по напряжению или коэффициенту распределения напряжения,  $k_U^{(n)}$ . Величина  $k_U^{(n)}$  может быть определена по параметрам сети между узлами источника изменений напряжения и исследуемым узлом.

Кратковременная доза фликера в узле  $n$ ,  $P_{st}^{(n)}$ , связанном с источником искажений, определяется по выражению

$$P_{st}^{(n)} = P_{st} \cdot k_U^{(n)}, \quad (1.17)$$

где  $P_{st}$  – кратковременная доза фликера в узле с источником искажений, о.е.;  $k_U^{(n)}$  – коэффициент распределения напряжения, о.е.

Согласно методике, описанной в [54], коэффициент распределения напряжения в этом случае определяется по выражению

$$k_U^{(n)} = \frac{x_c}{x_k + x_{gn}}, \quad (1.18)$$

где  $x_k$  – сопротивление короткого замыкания питающей СЭС, Ом.

На рисунке 1.14 представлен фрагмент СЭС, имеющей в качестве источника искажений вентильный преобразователь с резкопеременной ударной нагрузкой.

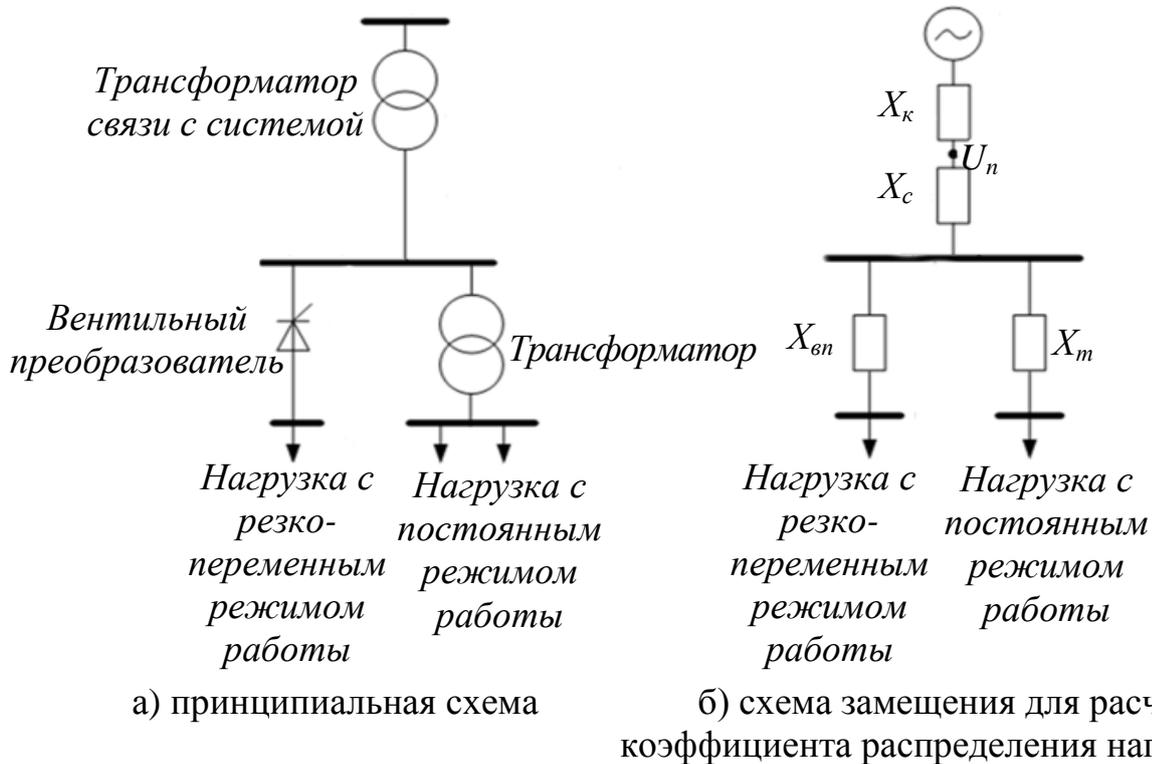


Рисунок 1.14 – Фрагмент СЭС

Наличие конденсаторных батарей в составе нагрузок значительно снижает точность определения  $k_U^{(n)}$ , что является недостатком описанного метода.

Анализ метода коэффициента распределения напряжения показал, что величина погрешности определения уровней фликера может превышать нормируемое стандартом [8] значение на 10 %. Поэтому реализация метода предполагает значительные упрощения. В частности, можно не учитывать активные сопротивления и емкостные проводимости. В связи с этим, область применения метода ограничивается расчетом уровней фликера на этапе проектирования электрической сети.

Для некоторых источников колебаний напряжения, в частности, для дуговых сталеплавильных печей, выявлена линейная зависимость между максимальным значением кратковременной дозы фликера,  $P_{stmax}$  и величиной длительной дозы фликера,  $P_{lt}$  [18, 19]. На этой зависимости построен метод, предлагаемый в [51, 52], согласно которому величина  $P_{lt}$  дуговых сталеплавильных печей определяется по выражению

$$P_{lt} = k_{st} \cdot P_{stmax} . \quad (1.19)$$

Определение коэффициента регрессии,  $k_{st}$  может быть осуществлено для различных типов печей путем непосредственных измерений.

Приближенное значение  $P_{stmax}$  может быть вычислено по выражению

$$P_{stmax} = k_{st} U_I = k_{st} \frac{S_{nm}}{S_{кз}} , \quad (1.20)$$

где  $S_{nm}$  – мощность печного трансформатора, МВА  $S_{кз}$  – мощность короткого замыкания, МВА.

На рисунке 1.15 показано соотношение между измеренными значениями  $P_{stmax}$  и соответствующими значениями  $S_{nm}/S_{кз}$ , о.е.

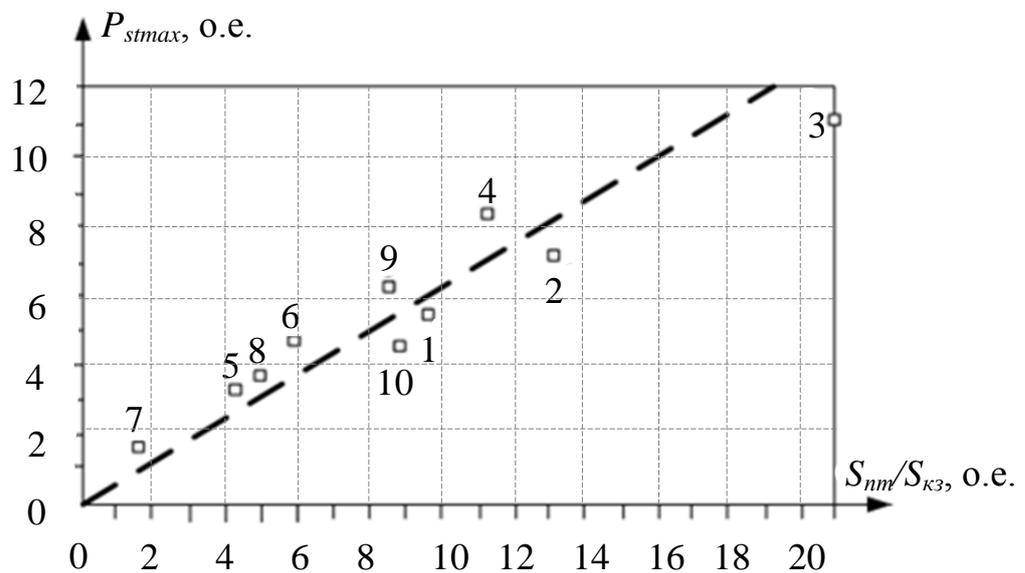


Рисунок 1.15 – График зависимости  $P_{stmax}$  от отношения  $S_{nm}/S_{кз}$

Эти величины получены в результате измерений на десяти некомпенсированных дуговых сталеплавильных печей. Коэффициент  $k_{st}$  находится в диапазоне значений  $48 \div 85$  о.е., при среднем значении, 60 о.е.

Для длительной дозы фликера наблюдается зависимость, аналогичная выражению (1.20):

$$P_{lt} = k_{lt} \frac{S_{nm}}{S_{кз}}, \quad (1.21)$$

где  $k_{st}$  – коэффициент регрессии  $P_{lt}$ , о.е.

Расчет  $P_{lt}$  предполагает следующие допущения:

1. Величина  $S_{nm}$  соответствует мощности эксплуатационного короткого замыкания дуговой сталеплавильной печи при полностью опущенных электродах.

2. Мощность короткого замыкания сети  $S_{кз}$  в точке общего присоединения должна соответствовать минимальному значению, которое могло бы иметь место в течение длительных промежутков времени в году.

3. Коэффициент  $k_{lt}$  может находиться в широких пределах, так как его значение зависит от множества факторов, в частности, от типа печи, вида загрузки, особенности работы и др.

Наличие данных допущений свидетельствует о пригодности метода только для оценки уровней фликера на этапе проектирования электрической сети.

В монографии [54] предлагается методика расчета  $P_{st}$  с использованием известного для дуговой сталеплавильной печи закона распределения колебаний напряжения. Такой подход подразумевает наличие определенной погрешности, величина которой зависит от соответствия выбранного закона распределения колебаний напряжения реальному потребителю с резкопеременной нагрузкой.

В работах [57÷66] предлагается аналитический метод оценки фликера с применением взвешивающего фильтра фликерметра, который описывается дифференциальным уравнением 11-го порядка. Для нахождения аналитического решения этого уравнения при постоянных и случайных помехах предложен метод парциальных реакций. Его суть заключается в замене стандартного взвешивающего фильтра, представленного в [3], эквивалентной системой, состоящей из одиннадцати параллельно включенных инерционных звеньев первого порядка. Данный подход является общим и аналитически точным для

колебаний напряжения любой формы. Он пригоден для оценки фликера на этапе проектирования электрических сетей.

Приведенные аналитические методы предполагают использование в электрических сетях ламп накаливания мощностью 60 Вт. В случаях использования других источников света оценка фликера этими методами будет выполняться с методической погрешностью.

### **1.2.2. Метод непосредственных измерений кратковременной дозы фликера**

Оценку фликера при колебаниях напряжения произвольного вида выполняют путем непосредственных измерений  $P_{st}$  с использованием фликерметра [8].

Функциональные и конструктивные требования к фликерметрам представлены в стандарте [3]. К фликерметрам предъявляются следующие основные требования:

- для всех значений  $d$  и  $f_{кн}$ , соответствующих НЧХП, измеренное значение  $P_{st}$  должно быть равно 1 о.е.;

- входной преобразователь напряжения должен быть рассчитан на широкий диапазон номинальных напряжений сети: 66, 115, 220, 230, 400, 690 В – для систем 50 Гц; 69, 120, 240, 277, 347, 480, 600 В – для систем 60 Гц;

- интервал наблюдения при оценке фликера должен быть выбран из ряда 1, 5, 10 или 15 мин.;

- определение  $P_{It}$  производится по последовательным значениям  $P_{st}$ .

Известны два способа реализации фликерметров: на аналоговых элементах и с применением цифровой элементарной базы [67÷78]. В настоящее время аналоговые приборы на практике не используются, потому что при их изготовлении и калибровке требуются значительные трудозатраты, особенно при настройке отдельных модулей, работающих на операционных усилителях. В этой связи основной концепцией при создании фликерметров является использование микроконтроллеров, способных на практике реализовать любой математический аппарат.

Процесс зрительного восприятия фликера моделируется на основе теории прохождения сложного сигнала через нелинейную динамическую систему [18, 19, 79].

На рисунке 1.16 представлена амплитудно-частотная характеристика фликерметра [69], из которой видно, что наибольшее влияние на зрение человека оказывают колебания светового потока, вызванные колебаниями напряжения в электрической сети с частотой 8,8 Гц.

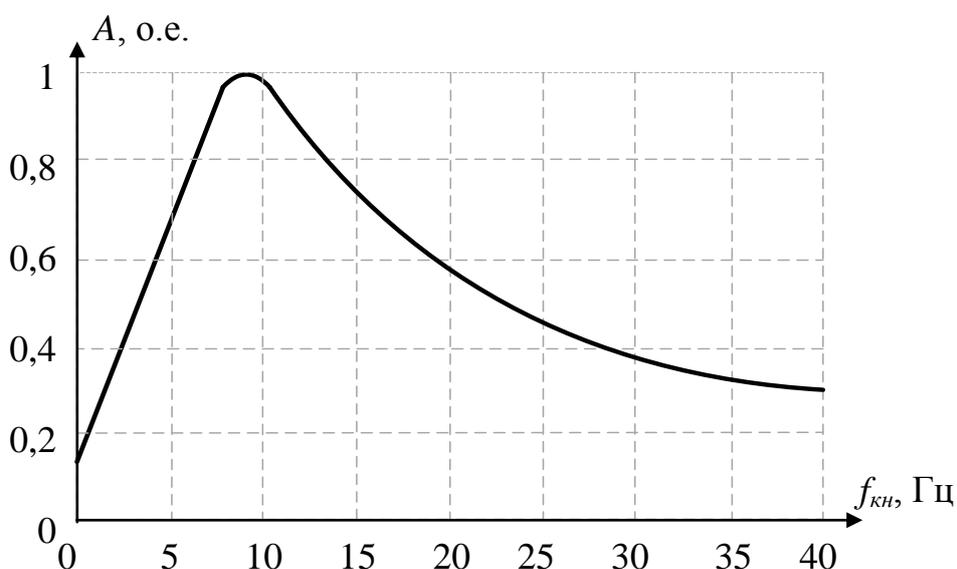


Рисунок 1.16 – Амплитудно-частотная характеристика фликерметра

В 1986 г. Международный союз по использованию электрической энергии совместно с Международной электротехнической комиссией предложили функциональную схему фликерметра [13]. Эта схема используется и в действующем стандарте [3]. В соответствии с ней фликерметр состоит из пяти последовательно включенных блоков (см. рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 – Функциональная схема фликерметра:

блок 1 – адаптер входного напряжения; блок 2 – квадратичный умножитель;  
 блок 3 – взвешивающие фильтры; блок 4 – квадратичная обработка и  
 сглаживание; блок 5 – статистический анализ

В блоке 1 входное напряжение сети приводится к внутреннему опорному напряжению фликерметра. Это позволяет измерять уровни фликера в относительных единицах независимо от действительного уровня напряжения на входе прибора.

Для имитации характеристик лампы в блоке 2 воспроизводятся колебания напряжения путем возведения в квадрат входного напряжения, приведенного к внутреннему опорному напряжению фликерметра.

Блок 3 состоит из каскада двух последовательно включенных фильтров и селективного фильтра. Первый из двух последовательно включенных фильтров является высокочастотным и исключает компоненты пульсаций удвоенной частоты сети на выходе блока 2. Низкочастотный фильтр может быть использован для исключения любого компонента напряжения постоянного тока. Второй фильтр является взвешивающим фильтром, который моделирует частотный отклик зрительной системы человека на колебания напряжения, подаваемые на лампу накаливания. Передаточная функция такого взвешивающего фильтра,  $H_{220U}(S)$  выглядит следующим образом

$$H_{220U}(S) = \frac{k\omega_1 S}{S^2 + 2\lambda S + \omega_1^2} \frac{1 + \frac{S}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{S}{\omega_3}\right)\left(1 + \frac{S}{\omega_4}\right)}, \quad (1.22)$$

где  $k = 1,74802$ ;  $\lambda = 2\pi 4,05981$ ;  $\omega_1 = 2\pi 9,15494$ ;  $\omega_2 = 2\pi 2,27979$ ;  $\omega_3 = 2\pi 1,22535$ ;  $\omega_4 = 2\pi 21,9$ .

Блок 4 состоит из устройства квадратичной обработки сигналов и низкочастотного фильтра. Результирующее восприятие фликера при подаче колебаний напряжения на лампу моделируется нелинейной характеристикой, обеспечиваемой блоками 2÷4. Сигнал на выходе блока 4 представляет собой мгновенное значение фликера,  $P_{inst}$ .

Блок 5 определяет уровень фликера путем статистического анализа, осуществляемого в реальном времени.

Статистический анализ основан на разбиении амплитуды сигнала, характеризующего уровень фликера, на установленное число классов, которым соответствуют определенные диапазоны сигнала (см. рисунок 1.18, а). Сигнал уровня фликера опрашивается с постоянной частотой. Каждый раз, когда уровень фликера достигает определенного значения, счетчик соответствующего класса добавляет единицу к имеющемуся числу, таким образом, получается функция частотного распределения значений  $P_{inst}$ . Затем, суммируя показания счетчиков всех классов и учитывая показания счетчика каждого класса по отношению к общей сумме, получают функцию плотности вероятности уровня фликера, которая используется для расчета интегральной функции, применяемой при проведении статистического анализа уровня фликера (см. рисунок 1.18, б).

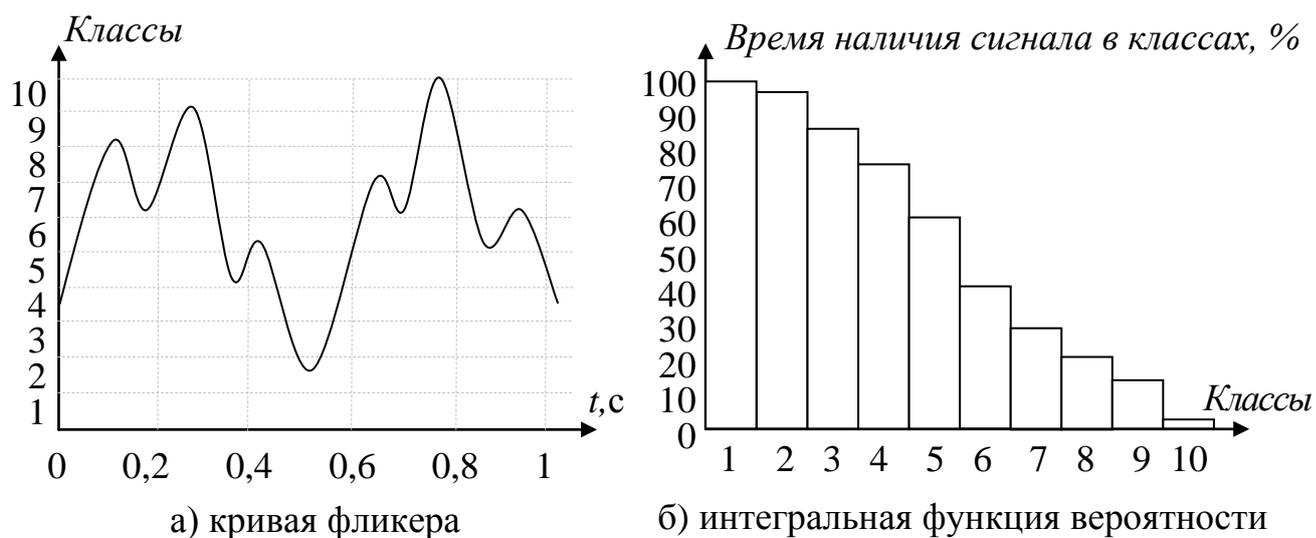


Рисунок 1.18 – Статистический анализ уровня фликера

Статистический анализ в реальном времени заключается в определении уровня фликера, соответствующего интегральной вероятности, равной: 0,1; 0,7; 1,0; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 17,0; 30,0; 50,0; 80,0%.

Значения сглаженного уровня фликера  $P_{insts}$  рассчитываются по выражениям

$$\left. \begin{aligned} P_{inst1s} &= \frac{P_{inst0,7} + P_{inst1,0} + P_{inst1,5}}{3} \\ P_{inst3s} &= \frac{P_{inst2,2} + P_{inst3,0} + P_{inst4,0}}{3} \\ P_{inst10s} &= \frac{P_{inst6} + P_{inst8} + P_{inst10} + P_{inst13} + P_{inst17}}{5} \\ P_{inst50s} &= \frac{P_{inst30} + P_{inst50} + P_{inst80}}{3} \end{aligned} \right\}, \quad (1.23)$$

где  $P_{inst1s}$ ,  $P_{inst3s}$ ,  $P_{inst10s}$ ,  $P_{inst50s}$  – значения сглаженного уровня фликера при интегральной вероятности, равной 1, 3, 10, 50 %, соответственно.

В заключение вычисляется значение  $P_{st}$  по формуле

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 P_{inst0,1} + 0,0525 P_{inst1s} + 0,0657 P_{inst3s} + 0,28 P_{inst10s} + 0,08 P_{inst50s}}. \quad (1.24)$$

Значение  $P_{lt}$  определяется по следующему выражению

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{k=1}^{12} P_{stk}^3}{12}}, \quad (1.25)$$

где  $P_{stk}$  – кратковременная доза фликера на  $k$ -м интервале времени наблюдения,  $T$ .

Метод непосредственных измерений  $P_{st}$  является самым точным в оценке фликера и позволяет определять уровень фликера в действующей электрической сети. Однако так же, как и известные аналитические методы, он не учитывает чувствительности к колебаниям напряжения применяемых ламп. Поэтому использование этого метода в оценке фликера ламп различных типов приводит к появлению методической погрешности. Кроме этого, не представляется возможным использование данного метода в оценке фликера на этапе проектирования электрических сетей.

### 1.2.3. Метод моделирования при оценке фликера

Моделирование – это универсальный метод, который позволяет проводить оценку фликера как на этапе проектирования электрических сетей, так и в ходе ее

эксплуатации. Моделирование может быть выполнено с помощью персонального компьютера в специализированных программах, таких как LabView и MatLab.

Известно множество отечественных [59, 60, 64, 66, 74, 75] и зарубежных [69, 76÷78] работ, в которых стандартная модель фликерметра реализована в программе MatLab. Область применения стандартного фликерметра и его модели ограничена оценкой фликера ламп накаливания мощностью 60 Вт. Поэтому при использовании ламп различных типов метод моделирования в большинстве случаев приведет к завышению или занижению результатов оценки фликера.

### 1.3. Методическая погрешность, вносимая в результаты оценки фликера стандартными методами

Оценка фликера ламп различных типов стандартными методами выполняется с методической погрешностью.

В таблице 1.3 представлены результаты измерений коэффициента пульсации освещенности  $K_n$  при использовании ламп накаливания и люминесцентных ламп для прямоугольных колебаний напряжения с параметрами, соответствующими экстремуму стандартной НЧХП:  $d=0,196\%$  и  $f_{кн}=8,8$  Гц.

Таблица 1.3 – Коэффициент пульсации освещенности

Тип и мощность ламп	$K_n, \%$
Накаливания 60 Вт	1,11
Люминесцентная 40 Вт	2,2

Из таблицы 1.3 видно, что одинаковые колебания напряжения у ламп накаливания мощностью 60 Вт и у люминесцентных ламп мощностью 40 Вт вызывают разные колебания светового потока.

Исследования показали, что колебания светового потока с  $K_n=2,2\%$  наблюдаются у ламп накаливания мощностью 60 Вт при колебаниях напряжения с  $d = 0,396\%$ . Результаты измерений с помощью фликерметра показывают, что таким колебаниям напряжения с частотой  $f_{кн}=8,8$  Гц соответствует  $P_{st}=1,98$  о.е.

Другими словами, колебания напряжения с  $d = 0,196\%$  и частотой  $f_{кн} = 8,8$  Гц вызывают у ламп накаливания мощностью 60 Вт колебания светового потока, соответствующие  $P_{st} = 1$  о.е., а у люминесцентных ламп мощностью 40 Вт эти же колебания напряжения вызывают колебания светового потока, соответствующие  $P_{st} = 1,98$  о.е.

Оценка фликера люминесцентных ламп мощностью 40 Вт выполняется с занижением результатов. Методическая погрешность такой оценки может быть определена по выражению

$$Err = \frac{P_{st}^n - P_{st}}{P_{st}^n} \cdot 100\%, \quad (1.26)$$

где  $P_{st}^n$  – фактическое значение кратковременной дозы фликера применяемой лампы, о.е.;  $P_{st}$  – кратковременная доза фликера, определенная в соответствии с нормами, о.е. [1].

$$Err = \frac{1,98 - 1}{1,98} \cdot 100\% = 49\%.$$

Другими словами, оценка фликера люминесцентных ламп стандартными методами для данного примера даёт занижение результатов на 49%.

На примере оценки фликера люминесцентных ламп можно предположить, что результаты оценки фликера ламп с меньшей чувствительностью к колебаниям напряжения по сравнению с лампами накаливания стандартными методами будут завышены.

Неучет типа применяемых ламп при оценке фликера стандартными методами приводит к появлению методической погрешности, которая не позволяет выполнить корректную оценку электромагнитной совместимости электрических сетей с применяемыми лампами. Это, в свою очередь, может привести к выбору неэффективных мероприятий по приведению уровня фликера к норме или к проведению мероприятий, которые не требуется.

Известны работы [78, 80÷91], в которых оценка фликера выполняется с учетом чувствительности ламп к колебаниям напряжения в электрической сети.

Однако в зарубежных и отечественных стандартах, связанных с оценкой фликера, положения этих работ не нашли отражения.

В настоящее время в стандартных методах оценки фликера отсутствует описание процесса корректировки полученных значений по чувствительности к колебаниям напряжения в электрической сети в зависимости от применяемых ламп.

#### **1.4. Мероприятия по нормализации фликера посредством снижения колебаний напряжения в электрической сети**

В настоящее время известно множество мероприятий по нормализации фликера, которые можно реализовать как на этапе проектирования, так и в ходе эксплуатации электрических сетей.

К мероприятиям, выполняемым на этапе проектирования электрических сетей, в России и за рубежом относят: подключение к мощной СЭС, питание потребителей с резкопеременным и постоянным режимами работы от разных источников, применение устройств продольной компенсации.

*Подключение к мощной СЭС* [6, 7, 15, 42, 92÷98]. Это мероприятие выполняется для увеличения мощности короткого замыкания СЭС. Предполагается, что распространение колебаний напряжения в сторону источника питания СЭС происходит с затуханием по амплитуде:

$$d \approx \frac{Q}{S_{кз}} \cdot 100\%, \quad (1.27)$$

где  $Q$  – реактивная мощность, МВар;  $S_{кз}$  – мощность короткого замыкания СЭС, МВА.

*Питание потребителей с резкопеременным и постоянным режимами работы от разных источников*, например трансформаторов или секций шин [18, 19, 29, 30, 51, 52, 54], осуществляется при помощи сдвоенных групповых реакторов или трансформаторов с расщепленной обмоткой.

В работах [18, 19, 99, 100] отмечается, что вариант применения сдвоенных реакторов является наиболее экономичным. Уменьшение фликера осуществляется путем ограничения колебаний напряжения, которое достигается за счет взаимоиндукции секций реактора.

Амплитуду колебаний напряжения в каждой секции обмоток реактора определяют по следующему выражению [18]:

$$\Delta \dot{U} = j \cdot x_L \cdot (\dot{I}_1 - k_M \cdot \dot{I}_2) = j \cdot x_L \cdot (\dot{I}_2 - k_M \cdot \dot{I}_1), \quad (1.28)$$

где  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  – ток нагрузки, кА в первой и второй секциях соответственно;  $x_L$  – индуктивное сопротивление секции реактора, Ом;  $k_M=0,5 \div 0,6$ , о.е. – коэффициент взаимоиндуктивной связи [19].

В идеальном случае, когда токи в плечах реактора равны, то есть  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$ , амплитуду колебаний напряжения определяют как

$$\Delta \dot{U} = \dot{I}_{1(2)} \cdot x_L \cdot (1 - k_M). \quad (1.29)$$

Колебания напряжения за счет взаимоиндуктивной связи уменьшаются на 50÷60 %. Однако, при неравенстве токов  $\dot{I}_1 \neq \dot{I}_2$  уменьшение величины  $\Delta U$  будет небольшим. Уровень колебаний напряжения зависит от сопротивления питающей сети до шин, к которым подключен реактор. Поэтому применение подобных схем для подключения дуговых сталеплавильных печей и мощных электродвигателей позволяет обеспечить на шинах нагрузки с постоянным режимом работы колебания напряжения, которые не превышают уровень, нормируемый в [20].

В монографиях [51, 52] для решения задачи нормализации фликера посредством снижения колебаний напряжения предлагается применение трансформаторов с расщепленными обмотками. При подключении к разным ветвям обмотки такого трансформатора нагрузок с постоянным и резкопеременным режимами работы, связь между значениями амплитуды относительных изменений напряжения на соответствующих шинах  $d^{спок}$  и  $d^{резкопер}$  можно представить в виде

$$d^{спок} = d^{резкопер} \cdot \frac{4 - k_{расц}}{4 + k_{расц}}, \quad (1.30)$$

где  $k_{расц}$  – коэффициент расщепления, равный  $3,34 \div 3,64$  о.е.

Основным достоинством трансформаторов с расщепленной обмоткой является снижение колебаний напряжения на шинах нагрузки с постоянным режимом работы на  $50 \div 60\%$ .

При неравномерной загрузке трансформаторов отмечается увеличение амплитуды колебаний напряжения. Одним из возможных способов их снижения является уменьшение активного сопротивления питающего участка сети, которое достигается путем увеличения сечения проводников линии.

*Применение устройств продольной компенсации* позволяет снизить индуктивное сопротивление линии электропередачи [33].

На рисунке 1.19 представлен участок электрической сети с устройством продольной компенсации, где  $U_1$  – напряжение в начале участка линии,  $U_2$  – напряжение в конце участка линии,  $I_2$  – ток нагрузки,  $x_l$  – индуктивное сопротивление линии,  $r_l$  – активное сопротивление линии,  $x_{унк}$  – индуктивное сопротивление устройства продольной компенсации.

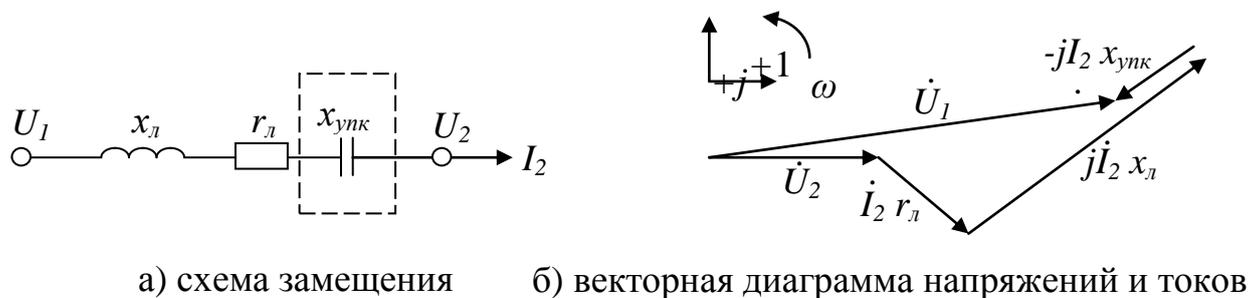


Рисунок 1.19 – Участок электрической сети с устройством продольной компенсации

В работах [33, 39] отмечается, что применение устройств продольной компенсации для снижения колебаний напряжения в электрической сети оказывается эффективным при значительном реактивном сопротивлении линии, когда отношение  $x_l/r_l$  велико, а также при невысоких значениях коэффициента мощности. В режиме максимальных нагрузок потребителей применение устройств продольной компенсации позволяет эффективно уменьшать колебания

напряжения, что может быть использовано для электроснабжения сварочных установок и рудно-термических печей.

Устройства продольной компенсации включаются последовательно со сварочными или печными трансформаторами. При этом, как отмечается в работах [51, 52], некоторые переходные режимы, в частности, резкие изменения нагрузки, шунтирование или дешунтирование батарей конденсаторов, приводят к возникновению феррорезонанса токов и субгармоническим колебаниям напряжения.

В мировой практике устройства продольной компенсации применяются достаточно часто, однако в России такие установки являются дорогостоящими и не находят широкого применения.

К мероприятиям по нормализации фликера посредством снижения колебаний напряжения, выполняемым в ходе эксплуатации электрических сетей относятся: применение оборудования с улучшенными характеристиками, использование быстродействующих синхронных компенсаторов и статических тиристорных компенсаторов (СТК).

*Применение оборудования с улучшенными характеристиками.* К этой категории мероприятий относят применение электродвигателей со сниженным пусковым током и улучшенным коэффициентом мощности при пуске, а также применение частотного регулирования электроприводов и устройств плавного пуска-останова двигателей.

*Применение быстродействующих синхронных компенсаторов.* Такие устройства в настоящее время считаются неэффективными в связи с наличием следующих недостатков: высокой удельной стоимости выработки реактивной мощности, связанной с дороговизной обслуживания, износом вращающихся частей и большими потерями, низким быстродействием [101]. В связи с этим быстродействующие синхронные компенсаторы в настоящее время не находят широкого применения.

*Применение статических тиристорных компенсаторов.* Они характеризуются высоким быстродействием, плавным изменением реактивной мощности, а также безынерционностью. На рисунке 1.20 приведена схема СТК с

параллельным включением регулируемой индуктивности управляемого реактора и нерегулируемой емкости конденсаторной батареи [43, 101, 102].

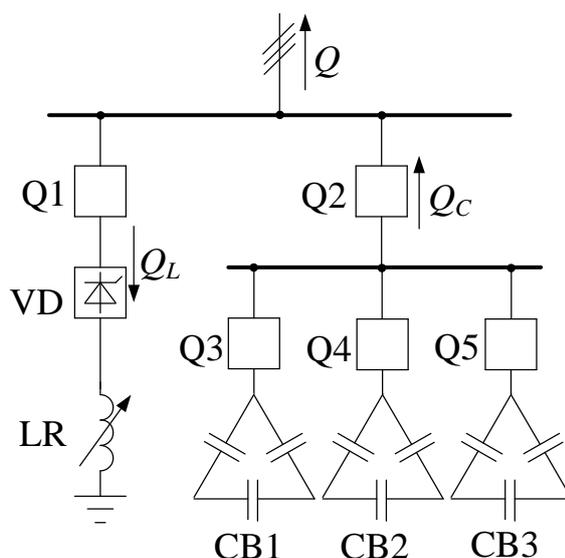


Рисунок 1.20 – Фрагмент электрической схемы СТК

Суммарная мощность СТК компенсатора может быть определена как

$$Q = Q_L - Q_C, \quad (1.31)$$

где  $Q_L$  – мощность, потребляемая реактором, кВар;  $Q_C$  – мощность, генерируемая конденсаторной батареей, кВар.

Значение и направление мощности СТК зависят от мощности, потребляемой реактором. При увеличении потребляемой нагрузкой реактивной мощности СТК увеличивает выработку до максимального значения, равного  $Q_C$ , а при снижении потребления нагрузки выработка понижается до минимального значения.

Для обеспечения компенсирующего эффекта время запаздывания генерации реактивной мощности должно быть минимальным, чтобы не вызвать увеличения уровня колебаний напряжения.

Например, при компенсации реактивной мощности прямоугольной формы  $Q_C$  (см. рисунок 1.21,а) с некоторым временем запаздывания,  $\Delta t$  вместо одного появляется два наброса реактивной мощности (см. рисунок 1.21,б), что приводит к увеличению уровня колебаний напряжения и, как следствие, к увеличению уровня фликера.

На рисунке 1.21 представлены графики изменения реактивной мощности нагрузки до применения СТК и после его применения [43].

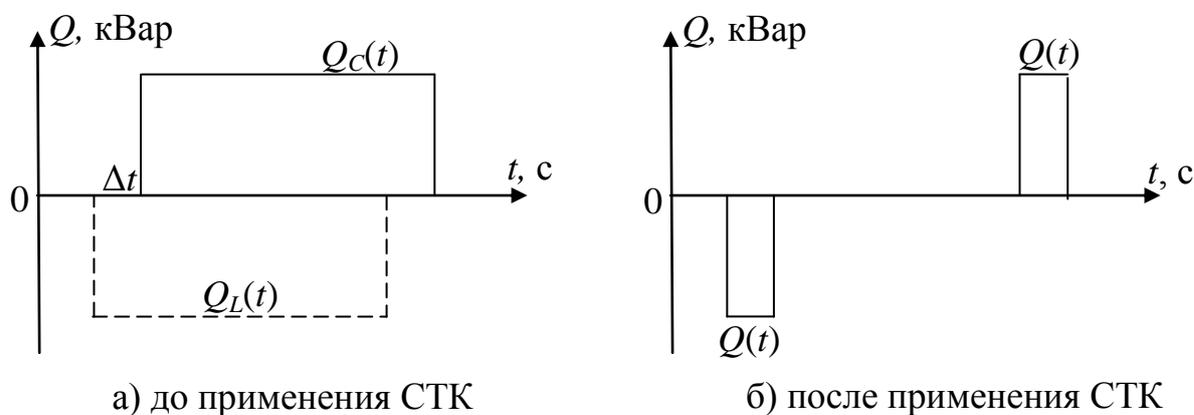


Рисунок 1.21 – Графики изменений реактивной мощности

Основным фактором, сдерживающим применение СТК в России, является их высокая стоимость и практическое отсутствие отечественной элементной базы.

Все известные мероприятия нормализации фликера посредством снижения колебаний напряжения в электрической сети являются дорогостоящими и требуют использования достаточно большого количества технических средств. В случае использования ламп с чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети, отличной от чувствительности, характерной для ламп накаливания мощностью 60 Вт, выбор параметров мероприятий по нормализации фликера посредством снижения колебаний напряжения осуществляется некорректно.

Проблема некорректного определения требуемого уровня снижения колебаний напряжения в электрической сети для нормализации фликера может быть решена с помощью усовершенствованных методов.

## 1.5. Выводы к главе 1

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. Применение 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 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. При выборе мероприятий по нормализации фликера посредством снижения колебаний напряжения необходимо учитывать чувствительность к колебаниям напряжения применяемых ламп.

## ГЛАВА 2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФЛИКЕРА

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 выполняется оценка колебаний напряжения в электрической сети по величине амплитуды относительных изменений напряжения,  $d$ , определяемую следующим образом [8]:

$$d = \frac{\Delta U}{U} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

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

На рисунке 2.1 представлен график колебаний напряжения в электрической сети, по которому определяется  $d$ .

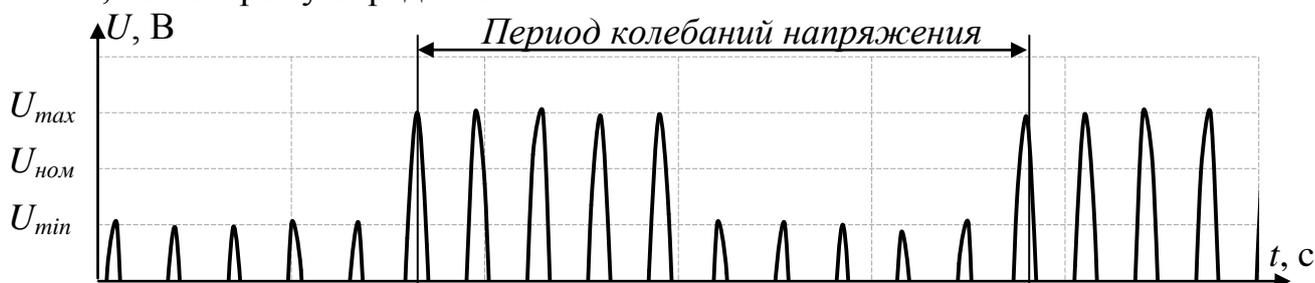


Рисунок 2.1 – График колебаний напряжения в электрической сети

Действующий стандарт [8] устанавливает нормы для колебаний напряжения на сетевых зажимах потребителя, который вносит эти колебания напряжения в электрическую сеть. В общем случае  $d$  не должна превышать 4%. Когда отключение/включение потребителя осуществляется вручную,  $d$  не должна превышать 6%.

Во втором случае выполняется оценка колебаний светового потока, с помощью коэффициент пульсации освещенности,  $K_n$ , который определяют следующим образом [45–47]

$$K_n = \frac{E_{max} - E_{min}}{2 \cdot E_{cp}} \cdot 100\% , \quad (2.2)$$

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 рисунке 2.2 представлен график колебаний светового потока лампы накаливания, по которому определяется  $K_n$ .

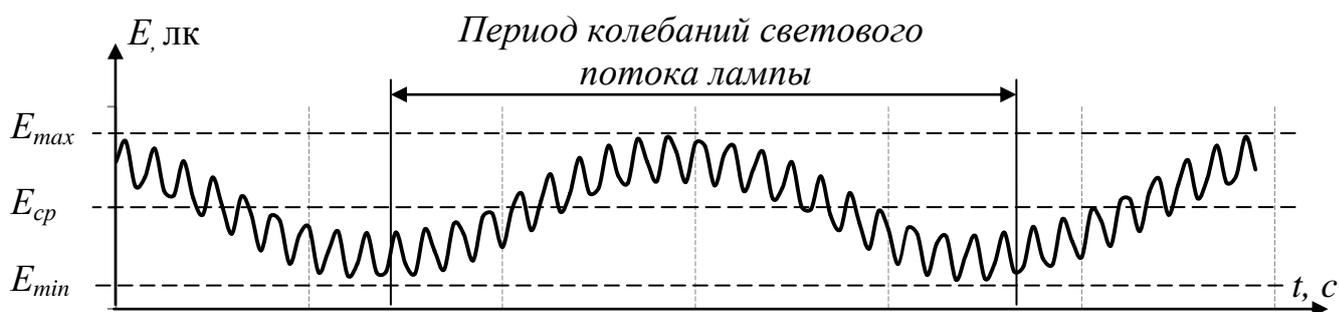


Рисунок 2.2 – График колебаний светового потока

Строительные нормы и правила [45] указывают на то, что в зависимости от степени напряженности работы, выполняемой человеком,  $K_n$  рабочей поверхности рабочего места не должен превышать 10÷20%. В местах работы за компьютером  $K_n$  не должен превышать 5% [47].

Не представляется возможным увязать между собой нормы колебаний светового потока ламп и нормы колебаний напряжения, вызываемых потребителем при подключении к электрическим сетям.

Например, колебания напряжения в электрической сети с  $d=4\%$  вызывают у ламп накаливания мощностью 60 Вт колебания светового потока с  $K_n \approx 22\%$ , а колебания напряжения с  $d=6\%$  –  $K_n \approx 33\%$ . То есть, при колебаниях напряжения с

предельно-допустимыми значениями  $d$  [8] возникают колебания светового потока  $K_n$ , которые превышают санитарные нормы [47].

Кроме этого, колебания напряжения в электрической сети в частотном диапазоне от 0,05 до 40 Гц вызывают у световых источников колебания светового потока, которые воспринимаются неодинаково. Наибольшее влияние на раздражение человека оказывают колебания напряжения в электрической сети с частотой, соответствующей экстремуму этих характеристик 8,8 Гц. Наименьшая  $d$ , вызывающая воспринимаемые человеком колебания светового потока ламп накаливания мощностью 60 Вт, составляет 0,196% [3]. Коэффициент пульсации освещенности таких колебаний светового потока составляет  $K_n=1,1\%$ . Следовательно,  $K_n$  не должен превышать значения 1,1%, а  $d$  принимается в зависимости от используемых световых источников.

В работах [78, 80÷91] рассматривается связь колебаний светового потока с колебаниями напряжения в электрической сети для ламп любого типа.

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

$$K_n = H(d, f_{кн}). \quad (2.3)$$

Структура связи между колебаниями светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Структура связи между колебаниями светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания

Нормы колебаний светового потока ламп и нормы колебаний напряжения в электрической сети, вызываемых электрической нагрузкой при её подключении к электрическим сетям, не соответствуют друг другу. Это связано с тем, что

стандартные методы оценки колебаний напряжения и методы оценки колебаний светового потока ламп не учитывают связи, присутствующей в выражении (2.3) связи. Учёт этой связи позволит исключить методическую погрешность оценки фликера ламп различных типов и установить не противоречащие друг другу нормы колебаний напряжения в электрической сети и нормы колебаний светового потока ламп. Для этой цели необходимо аппаратное обеспечение, позволяющее выполнять одновременные измерения колебаний светового потока различных ламп и колебаний напряжения в цепи их питания. Кроме того, требуется разработка методики расчета НЧХП ламп различных типов.

### **2.1. Методика расчета нормализованной частотной характеристики прибора**

Достоверная оценка фликера ламп различных типов может быть выполнена с использованием НЧХП ламп различных типов.

Для расчета НЧХП ламп различных типов разработана методика, содержащая

1. Определение кривой допустимых колебаний светового потока  $K_n^{P_{st}=1} = H(d, f_{кн})$ .

Данный пункт требует использования аппаратного обеспечения, позволяющего производить измерения колебаний светового потока ламп при заданных параметрах питающего их напряжения. С помощью аппаратного обеспечения для ламп накаливания мощностью 60 Вт при заданных параметрах колебаний напряжения, соответствующих стандартной НЧХП, проводится определение значений  $K_n$ . Результатом этого пункта должны быть значения  $K_n$ , в частотном диапазоне колебаний напряжения в электрической сети 0,05÷40 Гц, при которых уровень фликера соответствует порогу восприятия, то есть  $P_{st}=1$  о.е.

2. Определение функции связи колебаний светового потока лампы накаливания мощностью 60 Вт с колебаниями напряжения в цепи её питания  $K_n = H_{лн}(d, f_{кн})$ .

Средством Basic Fitting прикладного пакета программ MatLab данные колебаний напряжения и соответствующих им колебаний светового потока лампы накаливания мощностью 60 Вт приводятся к виду (2.3).

3. Определение уровней колебаний напряжения, при которых у ламп различных типов наблюдаются колебания светового потока допустимого уровня,  $d_{Pst=1}^л(f_{кн})$ .

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  $f_{кн}$  НЧХП стандарта [3].

4. Определение функции связи колебаний светового потока ламп различных типов с колебаниями напряжения в цепи её питания  $K_n = H_{л}(d, f_{кн})$ .

Средством Basic Fitting прикладного пакета программ MatLab данные колебаний напряжения и соответствующие им колебания светового потока ламп различных типов приводятся к виду (2.3).

5. 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

$$d_{лн}^{экв} = d \cdot \frac{H_{л}(d, f_{кн})}{H_{лн}(d, f_{кн})}. \quad (2.4)$$

6. Расчет значений поправочного коэффициента,  $p^л(f_{кн})$ .

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

$$p^л(f_{кн}) = \frac{d_{лн}^{экв}(f_{кн})}{d(f_{кн})}. \quad (2.5)$$

7. Расчет параметров НЧХП для ламп различных типов.

Параметры НЧХП для ламп различных типов рассчитываются по следующему выражению

$$d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн}) = \frac{d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн})}{p^л(f_{кн})}, \quad (2.6)$$

где  $d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн})$  – амплитуда относительных изменений напряжения, соответствующая стандартной НЧХП [3].

Для достоверной расчетной оценки фликера ламп различных типов достаточно использовать поправочный коэффициент  $p^л(f_{кн})$ , полученный в соответствии с выражением (2.5), и значение  $P_{st}$ , полученное стандартными расчетными методами [8]

$$P_{st}^л = p^л(f_{кн}) \cdot P_{st}. \quad (2.7)$$

Определение параметров НЧХП ламп различных типов для значений частот колебаний напряжения, приведенных в стандарте [3], может быть реализовано только по первому и третьему пункту приведенной методики. При необходимости достоверной оценки фликера во всем диапазоне частот колебаний напряжения, 0,05÷40 Гц, необходимо выполнение всех пунктов представленной методики.

На рисунке 2.4 изображен алгоритм расчета НЧХП представленной методики.

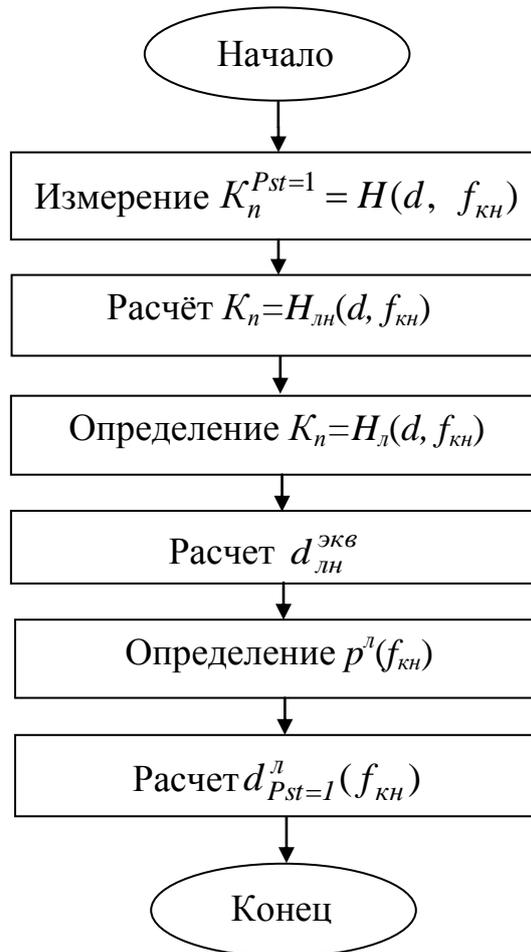


Рисунок 2.4 - Алгоритм расчета НЧХП

Данный алгоритм был использован в составе разработанного и созданного аппаратно-программного комплекса [90] при определении параметров кривой допустимых колебаний светового потока и параметров НЧХП ламп различных типов.

## **2.2. Аппаратное обеспечение для исследования связи колебаний светового потока ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания**

Исследование связи, содержащейся в выражении (2.3), для ламп различных типов может быть выполнено путем анализа результатов измерений колебаний

светового потока ламп в диапазоне колебаний напряжения, представленных в [3]. Реализация колебаний напряжения с заданными параметрами в цепи питания ламп различных типов и регистрация соответствующих им колебаний светового потока ламп различных типов требует специального аппаратного обеспечения, которое должно удовлетворять следующим требованиям:

- простота аппаратной реализации;
- полная автоматизация процесса измерений и их высокая точность;
- возможность исследования любых количественных соотношений ламп различных типов.

Для реализации аппаратного обеспечения, удовлетворяющего перечисленным требованиям, на кафедре электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета был разработан и создан аппаратно-программный комплекс (см. приложение 1) [90, 91]. В приложении 2 представлен патент на полезную модель. На рисунке 2.5 приведена функциональная схема аппаратно-программного комплекса, состоящего из управляемого источника питания (УИП), имеющего связь с электрической сетью, преобразователя напряжения, исследуемой лампы, фотоприемника (ФП), усилителя мощности и персонального компьютера (ПК) с каналами аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). В свою очередь, УИП содержит канал питания, дифференциальный вход (ДВ) и программируемый выход (ПВ).



Рисунок 2.5 – Функциональная схема аппаратно-программного комплекса

Аппаратная часть аппаратно-программного комплекса (см. рисунок 2.6) состоит из исследуемой лампы (8), выпрямителя (9) и фотоприемника с усилителем (10), заключенных в непрозрачный закрытый ящик (1), панели с каналами АЦП и ЦАП, платы ввода-вывода PCI L-783М (2), персонального компьютера (3), понижающего трансформатора 220В/40В (7), выпрямителя (6), усилителя мощности (5) и повышающего трансформатора 40В/220В (4).

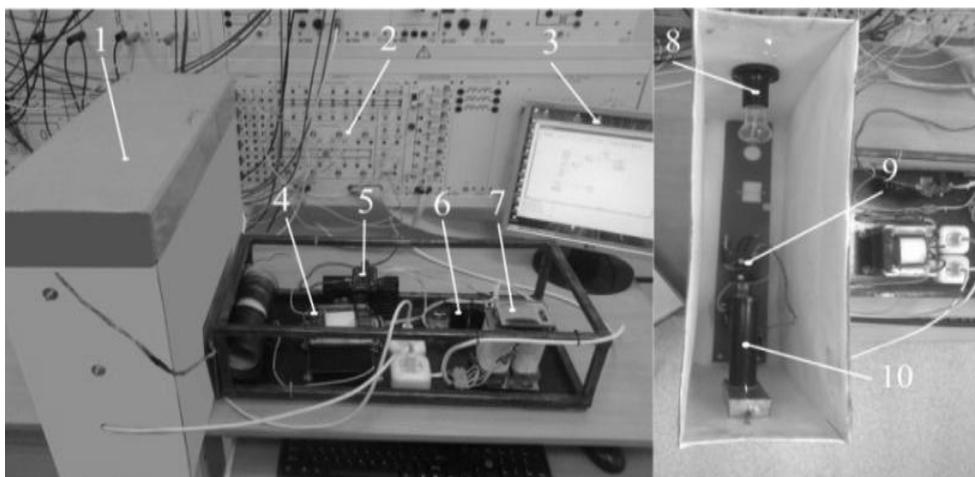


Рисунок 2.6 – Аппаратная часть аппаратно-программного комплекса

Наглядно принцип работы аппаратно-программного комплекса представлен на рисунке 2.7, согласно которому управляемый источник питания (блок 4) управляется сигналом с канала ЦАП платы ввода-вывода (блок 9), который, в свою очередь, связан с блоком, задающим параметры колебаний напряжения (блок 13). Величина светового потока исследуемой лампы анализируется фотоприёмником (блок 2), сигнал с которого усиливается в блоке 3. После этого усиленный сигнал поступает в АЦП канала светового потока (блок 8). Одновременно сигнал с блока 4 проходит через входной преобразователь напряжения (блок 7) и поступает в АЦП канала напряжения сети (блок 10). Далее цифровые сигналы из каналов напряжения (блок 10) и светового потока (блок 8) поступают в блок 12 для записи.



Рисунок 2.7 – Блок-схема аппаратно-программного комплекса

В цепи, питающей исследуемую лампу (блок 1), имеется входной преобразователь тока (блок 5), сигнал с которого поступает в соответствующий канал АЦП платы ввода-вывода PCI L-783M (блок 11) для обеспечения функции защиты аппаратно-программного комплекса от перегрузки.

### 2.3. Применение аппаратно-программного комплекса и анализ полученных экспериментальных данных

Реализация методики расчета НЧХП ламп различных типов была выполнена с использованием аппаратно-программного комплекса, лампы накаливания мощностью 60 Вт и ламп различных типов.

Параметры излучаемого светового потока ламп, используемых в реализации методики, представлены в таблице 2.1 [103÷106].

Таблица 2.1 – Параметры излучаемого светового потока ламп различных типов

Тип и мощность ламп	Излучаемый световой поток, лм
Накаливания 60 Вт	≈710
Люминесцентная 40 Вт	≈2000
Компактная люминесцентная 40 Вт	≈2400
Индукционная 15 Вт	≈2800
Светодиодная 11 Вт	≈750

Выбор лампы накаливания мощностью 60 Вт обусловлен тем, что в стандарте [3] представлена НЧХП для такой лампы.

*Лампы накаливания* представляют собой герметичную стеклянную колбу с вакуумом или инертным газом. Внутри колбы находится вольфрамовая спираль, которая при протекании по ней электрического тока нагревается и излучает свет.

К достоинствам лампы можно отнести низкую стоимость, малые габариты, отсутствие пускорегулирующей аппаратуры, высокое значение коэффициента мощности, отсутствие токсичных компонентов при утилизации.

К недостаткам – низкие световая отдача и коэффициент полезного действия, а также непродолжительный срок службы.

В соответствии с методикой расчета НЧХП выполнено измерение параметров кривой допустимых колебаний светового потока ламп.

Результаты измерений параметров кривой допустимых колебаний светового потока ламп приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений параметров кривой допустимых колебаний светового потока ламп

$f_{кн}, Гц$	$K_n, \%$								
0,5	2,84	5	1,62	10	1,13	17	2,33	25	4,3
1	2,61	5,5	1,5	10,5	1,18	18	2,53	25,5	4,24
1,5	2,39	6	1,38	11	1,23	19	2,76	28	5,31
2	2,22	6,5	1,28	11,5	1,29	20	2,97	30,5	6,1
2,5	2,06	7	1,21	12	1,35	21	3,23	33,3	1,26
3	1,95	7,5	1,14	13	1,53	21,5	3,32	37	0,98
3,5	1,9	8	1,11	14	1,7	22	3,38	40	12,8
4	1,84	8,8	1,09	15	1,87	23	3,75	–	–
4,5	1,74	9,5	1,11	16	2,08	24	4,16	–	–

Графическая интерпретация кривой допустимых колебаний светового потока ламп представлена на рисунке 2.8.

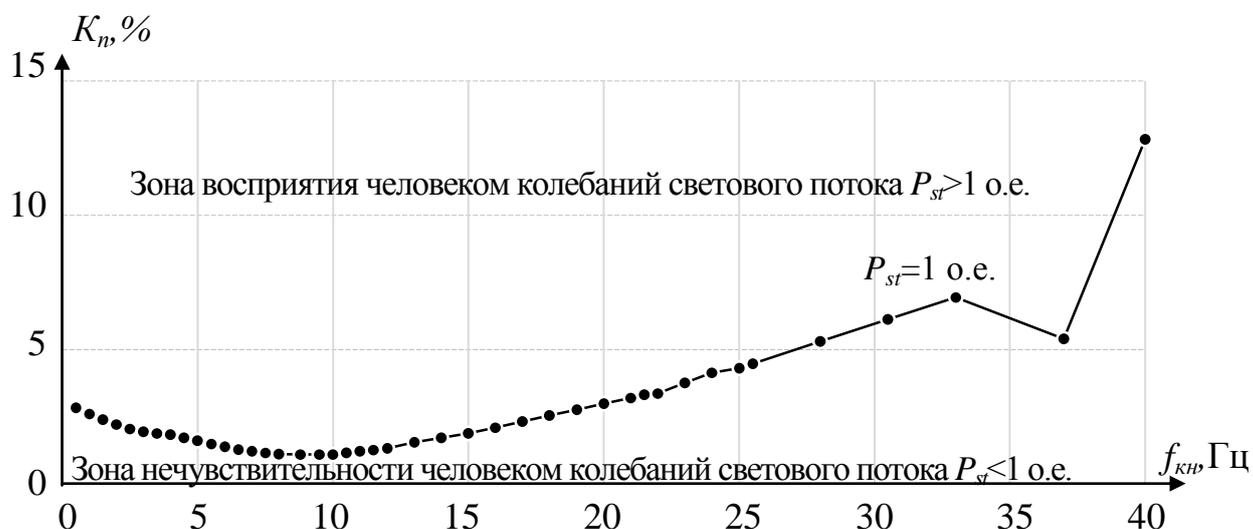


Рисунок 2.8 – Графическая интерпретация кривой допустимых колебаний светового потока

На рисунке 2.8 видно, что графическая интерпретация кривой допустимых колебаний светового потока также как и графическая интерпретация стандартной НЧХП ограничивает зоны восприятия и нечувствительности человеком колебаний светового потока.

Полученные параметры кривой допустимых колебаний светового потока использовались для поиска соответствующих им параметров НЧХП ламп различных типов: люминесцентных, компактных люминесцентных, индукционных и светодиодных ламп.

При помощи аппаратно-программного комплекса была выполнена регистрация колебаний светового потока в диапазоне колебаний напряжения прямоугольной формы, представленном в стандарте [3]. Полученные данные были использованы для расчета значений коэффициента пульсации освещенности в программной среде MatLab.

Фрагмент результатов определения коэффициента пульсации освещенности лампы накаливания мощностью 60 Вт представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Фрагмент результатов определения коэффициента пульсаций освещенности лампы накаливания мощностью 60 Вт

$f_{кн}, Гц$	$d, \%$													
	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
0,5	0,06	0,28	0,56	0,84	1,11	2,23	3,34	4,45	5,57	6,68	7,79	8,91	10	11,1
1	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,23	3,34	4,45	5,57	6,68	7,79	8,91	10	11,1
1,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,23	3,34	4,45	5,57	6,68	7,79	8,9	10	11,1
2	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,23	3,34	4,45	5,56	6,68	7,79	8,9	10	11,1
2,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,23	3,34	4,45	5,56	6,68	7,79	8,9	10	11,1
3	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,23	3,34	4,45	5,56	6,68	7,79	8,9	10	11,1
3,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,34	4,45	5,56	6,67	7,79	8,9	10	11,1
4	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,34	4,45	5,56	6,67	7,79	8,9	10	11,1
4,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,34	4,45	5,56	6,67	7,79	8,9	10	11,1
5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,34	4,45	5,56	6,67	7,78	8,9	10	11,1
5,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,34	4,45	5,56	6,67	7,78	8,89	10	11,1
6	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,34	4,45	5,56	6,67	7,78	8,89	10	11,1
6,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,45	5,56	6,67	7,78	8,89	10	11,1
7	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,45	5,56	6,67	7,78	8,89	10	11,1
7,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,56	6,67	7,78	8,89	10	11,1
8	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,56	6,67	7,78	8,89	10	11,1
8,8	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,55	6,66	7,78	8,89	10	11,1
9,5	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,55	6,66	7,77	8,88	10	11,1
10	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,55	6,66	7,77	8,88	10	11,1
11	0,06	0,28	0,56	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,55	6,66	7,77	8,88	10	11,1
12	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,55	6,66	7,77	8,88	10	11,1
13	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,55	6,66	7,77	8,88	10	11,1
14	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,55	6,65	7,76	8,87	10	11,1
15	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,33	4,44	5,54	6,65	7,76	8,87	10	11,1
16	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,33	4,43	5,54	6,65	7,76	8,87	10	11,1
17	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,32	4,43	5,54	6,65	7,76	8,87	10	11,1
18	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,32	4,43	5,54	6,65	7,75	8,86	10	11,1
19	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,22	3,32	4,43	5,54	6,65	7,75	8,86	10	11,1
20	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,21	3,32	4,43	5,54	6,64	7,75	8,86	10	11,1
21	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,21	3,32	4,43	5,53	6,64	7,75	8,86	10	11,1
22	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,21	3,32	4,43	5,53	6,64	7,75	8,85	10	11,1
23	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,21	3,32	4,42	5,53	6,64	7,74	8,85	10	11,1
24	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,21	3,32	4,42	5,53	6,64	7,74	8,85	10	11,1
25	0,06	0,28	0,55	0,83	1,11	2,21	3,32	4,42	5,53	6,63	7,74	8,84	10	11,1
30,5	0,06	0,28	0,55	0,83	1,1	2,21	3,31	4,42	5,52	6,62	7,73	8,83	9,9	11
33,3	0,06	0,28	0,55	0,83	1,1	2,21	3,31	4,41	5,51	6,62	7,72	8,82	9,9	11
37	0,06	0,28	0,55	0,83	1,1	2,2	3,31	4,41	5,51	6,61	7,71	8,81	9,9	11
40	0,06	0,28	0,55	0,83	1,1	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	7,71	8,81	9,9	11

Анализ данных, приведенных в таблице 2.3, показал связь величины  $K_n$  с частотой колебаний напряжения  $f_{кн}$ . При увеличении  $f_{кн}$  наблюдается увеличение значений  $K_n$ .

*Люминесцентные лампы* – это газоразрядные лампы низкого давления, которые представляют собой цилиндрическую трубку с электродами, содержащую пары ртути и инертный газ. На внутреннюю поверхность трубки нанесен люминофор. Электрический разряд между электродами генерирует невидимое человеческим глазом ультрафиолетовое излучение, которое затем преобразуется люминофором в видимый свет.

К достоинствам люминесцентных ламп можно отнести высокие световую отдачу и коэффициент полезного действия, по сравнению с лампами накаливания, рассеянный свет и длительный срок службы.

К недостаткам люминесцентных ламп относятся химическая опасность, мерцание лампы с удвоенной частотой питающей сети (100 Гц), низкий коэффициент мощности и невозможность прямого включения в электрическую сеть без дополнительных балластных приспособлений.

В настоящее время наибольшее распространение получили схемы подключения люминесцентных ламп с электромагнитными и электронными балластами. Основным преимуществом электромагнитного балласта являются простота конструкции и низкая стоимость. Недостатками данной схемы включения являются долгий запуск, низкий коэффициент мощности, акустические шумы при работе, мерцание лампы с удвоенной частотой сети, а также большие габариты и вес. Преимуществом электронного балласта является отсутствие мерцания и акустического шума, компактные размеры и небольшая масса.

По исполнению люминесцентные лампы делятся на линейные и компактные. К первым относят двухцокольные ртутные лампы низкого давления прямой, кольцевой или U-образной формы. Ко вторым – люминесцентные лампы с

изогнутой трубкой, включенные по схеме электронного балласта, которые по принципу своего действия практически не отличаются от обычных люминесцентных ламп и имеют аналогичные технические характеристики.

Определение функций связи колебаний светового потока с колебаниями напряжения в цепи их питания у люминесцентных ламп осуществлено по результатам измерений  $K_n$ , выполненных в меньшем, по сравнению с лампами накаливания, амплитудном диапазоне колебаний напряжения. Это связано с тем, что у люминесцентных ламп мощностью 40 Вт наблюдались колебания светового потока, соответствующие кривой допустимых колебаний светового потока, при меньших уровнях колебаний напряжения по сравнению с лампами накаливания мощностью 60 Вт. Напротив, при использовании компактной люминесцентной лампы мощностью 15 Вт для достижения колебаний светового потока, соответствующих кривой допустимых колебаний светового потока, потребовалось расширение амплитудного диапазона колебаний напряжения.

Результаты определения значений коэффициента пульсации освещенности люминесцентной лампы мощностью 40 Вт и компактной люминесцентной лампы, соответствующих колебаний напряжения в цепи их питания, представлены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Фрагмент результатов определения коэффициента пульсации освещенности люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

$f_{кн}, Гц$	$d, \%$													
	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
0,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
1	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
1,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
2	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
2,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
3	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22

Продолжение таблицы 2.4

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
3,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
4	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
4,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
5,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
6	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
6,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
7	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
7,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
8	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
8,8	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
9,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
10	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
11	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
12	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
13	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
14	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
15	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
16	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
17	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
18	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
19	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
20	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
21	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
22	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
23	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
24	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
25	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
30,5	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
33,3	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
37	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22
40	0,11	0,55	1,1	1,65	2,2	4,4	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22

Таблица 2.5 – Фрагмент результатов определения коэффициента пульсации освещенности компактной люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

$f_{кн}, Гц$	$d, \%$														
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
0,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
1	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
1,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
2	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
2,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
3	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
3,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
4	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
4,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
5,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
6	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
6,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
7	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
7,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
8	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
8,8	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
9,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
10	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
11	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
12	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
13	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
14	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
15	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
16	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
17	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
18	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
19	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
20	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
21	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
22	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
23	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
24	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
25	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
30,5	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
33,3	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
37	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1
40	0,02	0,1	0,2	1,01	2,02	3,03	4,04	5,06	6,07	7,08	8,09	9,1	10,1	11,1	12,1

Анализ данных, приведенных в таблицах 2.4 и 2.5, зависимости величины  $K_n$  от  $f_{кн}$  не выявил.

Рассчитанные параметры НЧХП для люминесцентной лампы мощностью 40 Вт представлены в таблицах 2.6, рассчитанные параметры НЧХП для компактной люминесцентной лампы мощностью 15 Вт – в таблицах 2.7.

Таблица 2.6 – Параметры НЧХП для люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

$f_{кн}, \Gamma\text{ц}$	$d, \%$								
0,5	0,259	5	0,147	10	0,103	17	0,212	25	0,392
1	0,237	5,5	0,136	10,5	0,107	18	0,231	25,5	0,406
1,5	0,217	6	0,126	11	0,112	19	0,251	28	0,484
2	0,202	6,5	0,117	11,5	0,118	20	0,271	30,5	0,556
2,5	0,188	7	0,11	12	0,123	21	0,294	33,3	0,632
3	0,178	7,5	0,104	13	0,139	21,5	0,302	37	0,489
3,5	0,173	8	0,101	14	0,155	22	0,308	40	1,167
4	0,168	8,8	0,099	15	0,171	23	0,342	–	–
4,5	0,159	9,5	0,101	16	0,19	24	0,379	–	–

Таблица 2.7 – Параметры НЧХП для компактной люминесцентной лампы мощностью 15 Вт

$f_{кн}, \Gamma\text{ц}$	$d, \%$								
0,5	1,404	5	0,8	10	0,557	17	1,151	25	2,127
1	1,288	5,5	0,74	10,5	0,582	18	1,252	25,5	2,203
1,5	1,181	6	0,684	11	0,609	19	1,364	28	2,628
2	1,098	6,5	0,635	11,5	0,639	20	1,47	30,5	3,016
2,5	1,021	7	0,596	12	0,67	21	1,598	33,3	3,431
3	0,996	7,5	0,566	13	0,754	21,5	1,642	37	2,656
3,5	0,941	8	0,549	14	0,839	22	1,672	40	6,334
4	0,91	8,8	0,538	15	0,927	23	1,855	–	–
4,5	0,861	9,5	0,546	16	1,031	24	2,059	–	–

*Индукционные лампы* – это разновидность безэлектродных ламп, принцип работы которых основан на создании газового разряда высокочастотным магнитным полем для генерации видимого света. Основным отличием индукционной лампы от существующих газоразрядных ламп является отсутствие термокатодов и нитей накаливания, что значительно увеличивает срок службы.

Индукционная лампа состоит из трёх основных частей: газоразрядной трубки с люминофором, магнитного кольца или стержня с индукционной катушкой и генератора высокочастотного тока.

По виду индукции существуют два типа конструкции индукционных ламп:

- внешняя индукция (магнитное кольцо расположено вокруг трубки);
- внутренняя индукция (магнитный стержень расположен внутри колбы).

По способу размещения генератора высокочастотного тока существуют лампы с отдельным и встроенным генератором. В соответствии с принципом действия, генератор вырабатывает высокочастотный ток, протекающий по индукционной катушке, которая создает высокочастотное магнитное поле, вызывающее разряд в газе. Под воздействием ультрафиолетового излучения такого разряда происходит свечение люминофора.

Существенным преимуществом индукционных ламп по сравнению с люминесцентными лампами является отсутствие электродов. Это делает баллон лампы однородным и равномерным по температуре. При длительной работе не происходит растрескивания баллона вокруг электродов и материал электродов не осаждается на баллоне лампы.

К достоинствам индукционных ламп относятся длительный срок эксплуатации, высокая световая отдача, независимость срока службы от числа циклов «включение–отключение», мгновенное зажигание и отсутствие мерцания при работе, низкая температура нагрева лампы, возможность изменения яркости с помощью обычного диммера для ламп накаливания, короткий срок окупаемости, мягкий и естественный свет.

Основными недостатками индукционных ламп являются большие размеры газоразрядной трубки и чувствительность к температуре окружающей среды, а также высокая стоимость.

Результаты определения коэффициента пульсации освещенности для индукционной лампы приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Фрагмент результатов определения коэффициента пульсации освещенности индукционной лампы мощностью 15 Вт

$f_{кн}, \Gamma\text{ц}$	$d, \%$														
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
1	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
1,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
2	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
2,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
3	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
3,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
4	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
4,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
5,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
6	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
6,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
7	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
7,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
8	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
8,8	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
9,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
10	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
11	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
12	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
13	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
14	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
15	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
16	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
17	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
18	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
19	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
20	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
21	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
22	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
23	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
24	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
25	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
30,5	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
33,3	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
37	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5
40	0,01	0,06	0,11	0,57	1,13	2,27	3,4	4,54	5,67	6,8	7,94	9,07	10,2	11,3	12,5

Анализ данных, приведенных в таблице 2.8, зависимости величины  $K_n$  от  $f_{кн}$  не выявил.

В соответствии с методикой расчета НЧХП были определены параметры НЧХП для индукционной лампы мощностью 15 Вт (см. таблицу 2.9).

Таблица 2.9 – Параметры НЧХП для индукционной лампы мощностью 40 Вт

$f_{кн}, \text{Гц}$	$d, \%$								
0,5	2,504	5	1,427	10	0,994	17	2,052	25	3,793
1	2,297	5,5	1,319	10,5	1,038	18	2,232	25,5	3,929
1,5	2,106	6	1,221	11	1,087	19	2,432	28	4,686
2	1,958	6,5	1,132	11,5	1,14	20	2,622	30,5	5,378
2,5	1,82	7	1,063	12	1,194	21	2,85	33,3	6,118
3	1,722	7,5	1,009	13	1,345	21,5	2,928	37	4,736
3,5	1,678	8	0,98	14	1,496	22	2,981	40	11,29
4	1,623	8,8	0,96	15	1,652	23	3,307	–	–
4,5	1,535	9,5	0,974	16	1,838	24	3,672	–	–

Светодиодные лампы представляют собой помещенные в корпус преобразователь питания и светодиодные источники света. Принцип работы светодиодных ламп заключается в использовании рекомбинационного свечения «р-п» перехода.

К преимуществам таких ламп можно отнести низкое энергопотребление, длительный срок службы, отсутствие токсичных компонентов, небольшие габариты, высокий коэффициент мощности. При этом, основным недостатком таких ламп является высокая стоимость.

Результаты определения коэффициента пульсации освещенности для светодиодной лампы представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Фрагмент результатов определения коэффициента пульсации освещенности светодиодной лампы мощностью 11 Вт

$f_{кн}, Гц$	$d, \%$														
	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
0,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
1	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
1,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
2	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
2,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
3	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
3,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
4	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
4,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
5,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
6	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
6,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
7	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
7,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
8	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
8,8	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
9,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
10	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
11	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
12	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
13	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
14	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
15	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
16	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
17	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
18	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
19	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
20	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
21	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
22	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
23	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
24	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
25	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
30,5	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
33,3	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
37	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52
40	0,16	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,52	3,52	3,52

Анализ данных, приведенных в таблице 2.10, зависимость величины  $K_n$  от  $f_{кн}$  не выявил.

В соответствии с методикой расчета НЧХП были определены параметры НЧХП для светодиодной лампы мощностью 11 Вт (см. таблицу 2.11).

Таблица 2.11 – Параметры НЧХП для светодиодной лампы мощностью 40 Вт

$f_{кн}, \text{Гц}$	$d, \%$						
0,5	17,68	5	10,07	10	7,018	17	14,49
1	16,22	5,5	9,312	10,5	7,328	18	15,76
1,5	14,87	6	8,618	11	7,672	19	17,17
2	13,83	6,5	7,994	11,5	8,051	20	18,51
2,5	12,85	7	7,508	12	8,43	21	20,13
3	12,16	7,5	7,127	13	9,499	21,5	20,67
3,5	11,85	8	6,918	14	10,57	22	21,05
4	11,46	8,8	6,778	15	11,67	–	–
4,5	10,84	9,5	6,881	16	12,98	–	–

Из таблицы 2.11 видно, что частотный диапазон колебаний напряжения, соответствующих кривой допустимых колебаний светового потока, охвачен не полностью. Это связано с тем, что при колебаниях напряжения с  $d > 21\%$  и  $f_{кн} > 22$  Гц у светодиодной лампы мощностью 11 Вт наблюдаются колебания светового потока, значения которых меньше значений  $K_n$ , соответствующих кривой допустимых колебаний светового потока.

Для сопоставления чувствительности ламп к колебаниям напряжения в таблице 2.12 приведены результаты определения коэффициента пульсации освещенности при одних и тех же колебаниях напряжения.

Таблица 2.12 – Коэффициент пульсации освещенности ламп различных типов при колебаниях напряжения с  $f_{кн} = 8,8$  Гц

$d, \%$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Тип и мощность ламп							
Накаливания 60 Вт	0,554	1,11	1,666	2,222	2,777	3,332	3,888
Люминесцентная 40 Вт	1,1	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	7,7
Компактная люминесцентная 40 Вт	0,202	0,404	0,606	0,808	1,011	1,213	1,146
Индукционная 15 Вт	0,113	0,227	0,34	0,454	0,567	0,68	0,794
Светодиодная 11 Вт	0,016	0,032	0,048	0,064	0,08	0,096	0,112

Из таблицы 2.12 видно, что при одинаковых колебаниях напряжения у люминесцентных ламп величина  $K_n$  больше, чем у ламп накаливания. С другой стороны, при одинаковых колебаниях напряжения значения  $K_n$  у светодиодных, компактных люминесцентных и индукционных ламп оказываются меньше, чем у ламп накаливания.

Вышеизложенные положения подтверждаются графической интерпретацией полученных данных (см. рисунок 2.9).

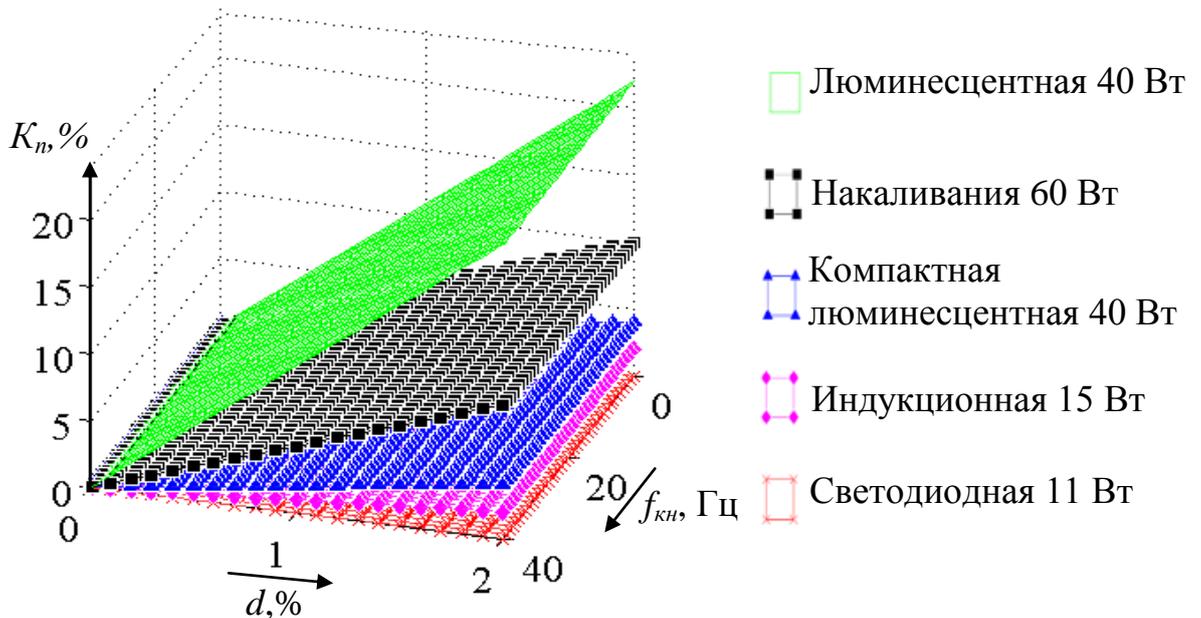


Рисунок 2.9 – Графическая интерпретация функции  $K_n = H(d, f_{kn})$  для ламп различных типов

Лампы накаливания обладают тепловой инерцией. Принцип их действия заключается в нагревании нити накаливания электрическим током, поэтому уровень колебаний светового потока таких ламп зависит от  $f_{kn}$ . В этой связи функцию зависимости колебаний светового потока от колебаний напряжения в общем виде можно представить следующим выражением

$$K_n = H_{лн}(d, f_{kn}). \quad (2.8)$$

Кроме того, в результате анализа измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса, для ламп накаливания мощностью 60 Вт, выявлена линейная зависимость между величинами  $K_n$  и  $d$ , а также между величинами  $K_n$  и  $f_{kn}$ . Поэтому функция вида (2.8) может быть представлена в следующем виде

$$K_n = d \cdot (A + B \cdot f_{кн}), \quad (2.9)$$

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

У источников света, имеющих отличный от ламп накаливания принцип действия, в результате анализа результатов измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса (см. таблицы 2.4, 2.5, 2.8, 2.10), зависимость между  $K_n$  и  $f_{кн}$  не выявлена. Поэтому функцию зависимости колебаний светового потока лампы от колебаний напряжения для этих ламп можно представить следующим выражением

$$K_n = H_l(d), \quad (2.10)$$

где  $H_l(d)$  – функция зависимости колебаний светового потока от колебаний напряжения в цепи питания лампы, имеющей принцип действия, отличный от лампы накаливания.

Кроме того в ходе анализа выявлена зависимость между  $K_n$  и  $d$ , поэтому функция вида (2.10) может быть представлена в виде выражения

$$K_n = A \cdot d, \quad (2.11)$$

где  $A$  – коэффициент, о.е.

Для определения коэффициентов полинома в выражении (2.9) и коэффициента в выражении (2.11) использована линейная аппроксимация и инструмент Curve Fitting Tool прикладного пакета MatLab.

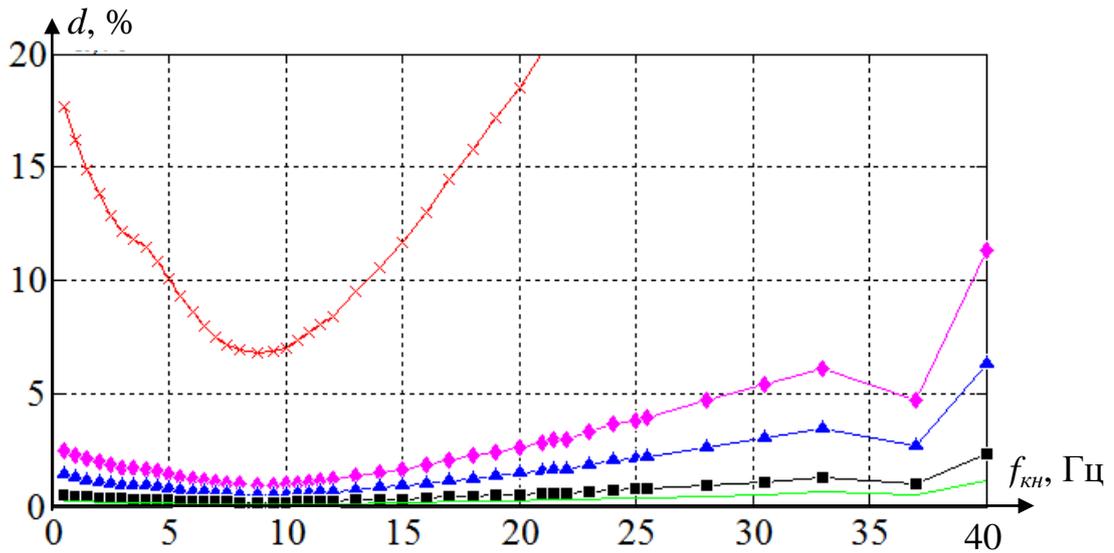
В аналитическом виде функции зависимости колебаний светового потока ламп от колебаний напряжения в цепи их питания представлены в таблице 2.13. Используя эти функции по выражениям (2.4) и (2.5) были рассчитаны параметры НЧХП для ламп различных типов (см. таблицу 2.14).

Таблица 2.13 – 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 11 Вт	$0,1606 \cdot d$

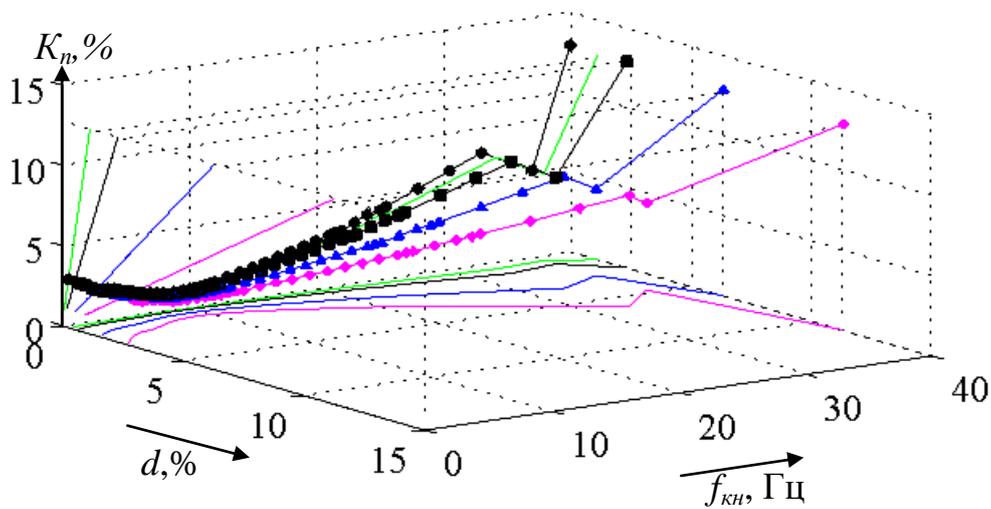
С помощью функций зависимости колебаний светового потока ламп от колебаний напряжения в цепи их питания (см. таблицу 2.13) по выражениям (2.4) и (2.5) были рассчитаны параметры НЧХП для ламп различных типов (см. таблицу 2.14).

Графическая интерпретация НЧХП для ламп различных типов представлена на рисунке 2.10.



а) двумерная интерпретация

- ×— светодиодная 11 Вт
- ◆— индукционная 15 Вт
- ▲— компактная люминесцентная 40 Вт
- накаливания 60 Вт
- люминесцентная 40 Вт
- кривая допустимых колебаний светового потока



б) трёхмерная интерпретация

Рисунок 2.10 – Графическая интерпретация НЧХП для ламп различных типов

В соответствии с рисунком 2.10, а, НЧХП для люминесцентной лампы 40 Вт находится ниже характеристики лампы накаливания мощностью 60 Вт, поэтому при одинаковых колебаниях напряжения уровень фликера от люминесцентных ламп будет больше, чем от ламп накаливания. С другой стороны, НЧХП компактной люминесцентной лампы, а также характеристики индукционной и светодиодной ламп располагаются выше стандартной НЧХП. Поэтому для таких ламп характерны меньшие уровни фликера по сравнению с лампами накаливания при одинаковых колебаниях напряжения в цепи их питания.

Из рисунка 2.10,б видно, что проекции всех полученных НЧХП на плоскость  $(K_n, 0, f_{кн})$  соответствуют кривой допустимых колебаний светового потока.

В таблице 2.14 представлены поправочные коэффициенты и результаты расчета параметров НЧХП для ламп следующих типов: накаливания (ЛН), компактных люминесцентных (КЛЛ), светодиодных (LED), люминесцентных (ЛЛ) и индукционных (ИндЛ). Диапазон НЧХП для светодиодной лампы, соответствующий колебаниям напряжения с  $f_{кн} > 23$  Гц, смоделирован с помощью функций, представленных в таблице 2.13.

Таблица 2.14 – Поправочные коэффициенты и результаты расчета параметров НЧХП для ламп различных типов

$f_{кн}$ , Гц	$d_{P_{st}=1}^{ЛН}$ , %	$d_{P_{st}=1}^{КЛЛ}$ , %	$p^{КЛЛ}(f_{кн})$ , о.е.	$d_{P_{st}=1}^{LED}$ , %	$p^{LED}(f_{кн})$ , о.е.	$d_{P_{st}=1}^{ЛЛ}$ , %	$p^{ЛЛ}(f_{кн})$ , о.е.	$d_{P_{st}=1}^{ИндЛ}$ , %	$p^{ИндЛ}(f_{кн})$ , о.е.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	0,51	1,44	0,363	17,679	0,028	0,259	1,975	2,503	0,203
1	0,47	1,288	0,363	16,221	0,028	0,237	1,976	2,297	0,203
1,5	0,43	1,181	0,363	14,867	0,028	0,217	1,976	2,105	0,203
2	0,4	1,098	0,363	13,825	0,028	0,202	1,976	1,958	0,203
2,5	0,37	1,021	0,363	12,853	0,028	0,188	1,97	1,820	0,203
3	0,35	0,966	0,363	12,159	0,028	0,178	1,973	1,721	0,203
3,5	0,34	0,941	0,363	11,845	0,028	0,173	1,976	1,677	0,203
4	0,33	0,91	0,363	11,463	0,028	0,168	1,977	1,623	0,203
4,5	0,31	0,861	0,363	10,838	0,028	0,159	1,978	1,534	0,203

Продолжение таблицы 2.14

<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0,29	0,8	0,363	10,074	0,028	0,147	1,978	1,426	0,204
5,5	0,27	0,74	0,363	9,3115	0,028	0,136	1,978	1,318	0,204
6	0,25	0,684	0,363	8,6179	0,028	0,126	1,97	1,220	0,204
6,5	0,23	0,635	0,363	7,993	0,028	0,117	1,973	1,132	0,204
7	0,22	0,596	0,363	7,508	0,028	0,11	1,979	1,063	0,204
7,5	0,21	0,566	0,363	7,126	0,028	0,104	1,979	1,009	0,204
8	0,2	0,549	0,36	6,918	0,028	0,101	1,980	0,979	0,204
8,8	0,2	0,538	0,364	6,778	0,028	0,099	1,980	0,959	0,204
9,5	0,2	0,546	0,364	6,88	0,028	0,101	1,98	0,974	0,204
10	0,2	0,557	0,364	7,017	0,028	0,103	1,983	0,993	0,204
11	0,22	0,609	0,364	7,672	0,028	0,112	1,981	1,086	0,204
12	0,24	0,67	0,364	8,430	0,028	0,123	1,982	1,193	0,204
13	0,28	0,754	0,364	9,498	0,028	0,139	1,983	1,345	0,204
14	0,31	0,839	0,364	10,56	0,028	0,155	1,983	1,496	0,204
15	0,34	0,927	0,364	11,66	0,028	0,171	1,984	1,652	0,204
16	0,38	1,031	0,364	12,97	0,028	0,19	1,984	1,837	0,204
17	0,42	1,151	0,364	14,49	0,028	0,212	1,985	2,052	0,204
18	0,46	1,252	0,365	15,762	0,028	0,231	1,985	2,232	0,204
19	0,5	1,364	0,365	17,171	0,028	0,251	1,986	2,431	0,204
20	0,54	1,47	0,365	18,511	0,028	0,271	1,987	2,621	0,204
21	0,58	1,598	0,365	20,125	0,028	0,294	1,987	2,85	0,204
22	0,61	1,672	0,365	21,049	0,028	0,308	1,988	2,981	0,205
23	0,68	1,855	0,365	23,351	0,028	0,342	1,988	3,307	0,205
24	0,75	2,059	0,365	25,926	0,028	0,379	1,989	3,671	0,205
25	0,78	2,127	0,365	26,779	0,028	0,392	1,989	3,792	0,205
28	0,96	2,628	0,366	33,084	0,028	0,484	1,991	4,685	0,205
30,5	1,11	3,016	0,366	37,975	0,028	0,556	1,993	5,378	0,205
33,3	1,26	3,431	0,366	43,197	0,028	0,632	1,994	6,117	0,205
37	0,98	2,656	0,37	33,444	0,028	0,489	1,996	4,736	0,205
40	2,33	6,334	0,367	79,75	0,028	1,167	1,998	11,294	0,206

Необходимо отметить, что значения поправочного коэффициента ламп различных типов на срезе одной частоты отличаются. Учитывая выражение (2.6), можно сделать вывод, что для люминесцентных ламп оценка фликера

стандартными методами будет выполнена с занижением результатов оценки фликера, потому что значения поправочных коэффициентов во всем частотном диапазоне восприятия фликера  $0,05 \div 40$  Гц больше 1 о.е. Напротив, для компактных люминесцентных, индукционных и светодиодных ламп применение стандартных методов приведет к завышению результатов оценки фликера, потому что значения поправочного коэффициента во всем частотном диапазоне восприятия фликера меньше 1 о.е.

В таблице 2.15. представлены значения методической погрешности оценки фликера ламп различных типов стандартными методами при колебаниях напряжения с  $d=0,199\%$  и  $f_{кн}=8,8$  Гц.

Таблица 2.15 – Значения методической погрешности оценки фликера ламп различных типов стандартными методами

Тип и мощность ламп	$P_{st}$ , о.е.	$P_{st}^л$ , 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

Значения методической погрешности оценки фликера ламп различных типов стандартными методами определены по выражению

$$Err = \frac{P_{st}^л - P_{st}}{P_{st}} \cdot 100\% , \quad (2.12)$$

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

По данным таблицы 2.15 видно, что оценка фликера стандартными методами у люминесцентных ламп мощностью 40 Вт может быть занижена почти в 2 раза, у компактных люминесцентных ламп мощностью 40 Вт – завышена почти в 2 раза,

у индукционных ламп мощностью 15 Вт – завышена в 4 раза, а у светодиодных ламп мощностью 11 Вт – завышена почти в 30 раз.

#### 2.4. Оценка погрешности измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса

Оценка достоверности результатов измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса, требует определения его погрешности. Для этого может быть использована схема, представленная на рисунке 2.11.

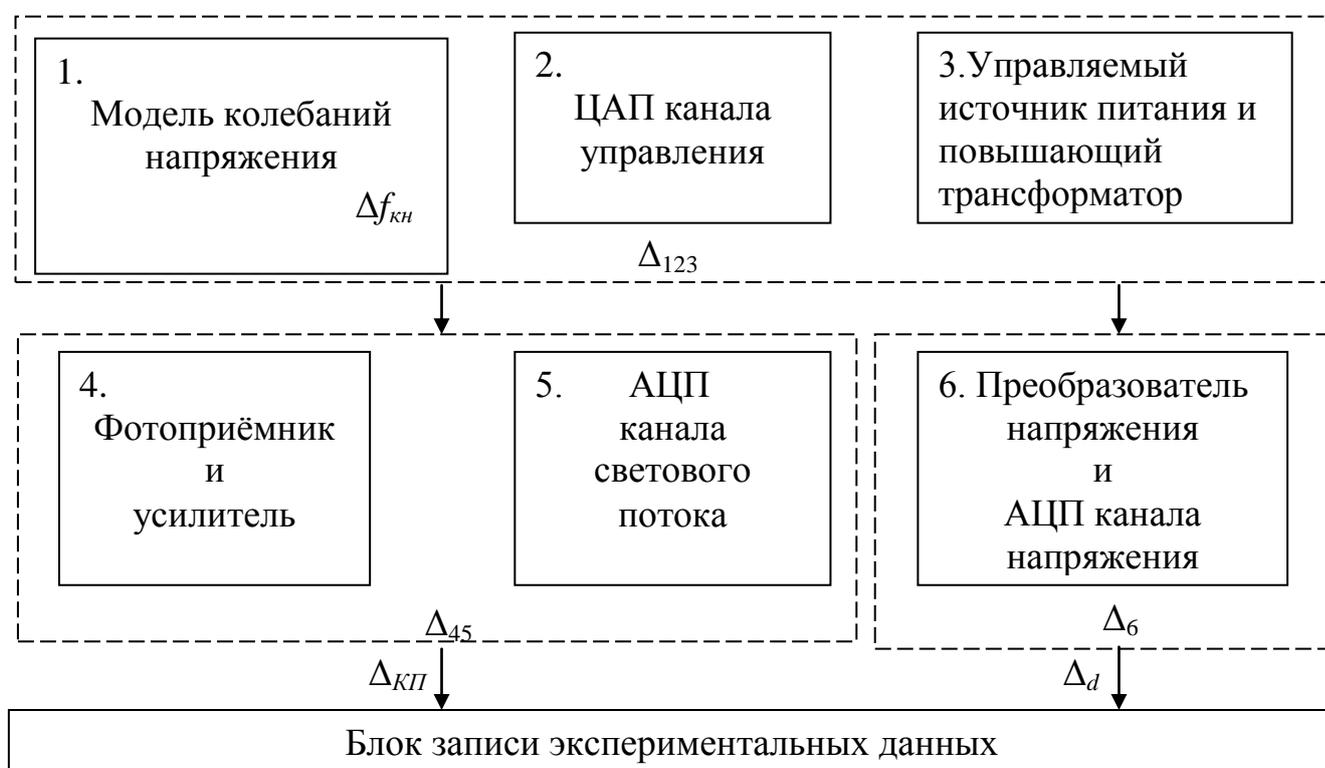


Рисунок 2.11 – Схема определения погрешности измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса

Погрешность использования аппаратно-программного комплекса зависит от трех величин, определяемых в процессе описания функции зависимости колебаний светового потока от колебаний напряжения в электрической сети:

- коэффициента пульсации освещенности;
- амплитуды относительных изменений напряжения;

- частоты колебаний напряжения в цепи питания ламп.

Причем соответствующие коэффициенту пульсации освещенности и амплитуде относительных изменений напряжения величины относительных погрешностей будут складываться из общей составляющей  $\Delta_{123}$  и дополнительных  $\Delta_{45}$  и  $\Delta_6$ .

Относительная погрешность при определении величины коэффициента пульсации освещенности и величины амплитуды относительных изменений напряжения могут быть определены как

$$\Delta_{кп} = \Delta_{123} + \Delta_{45}; \quad (2.13)$$

$$\Delta_d = \Delta_{123} + \Delta_6. \quad (2.14)$$

Функция зависимости колебаний светового потока применяемой лампы от колебаний напряжения в цепи её питания, учитывающая значения  $\Delta_{кп}$ ,  $\Delta_d$  и значения абсолютной погрешности определения частоты повторений колебаний напряжения,  $\delta f_{кн}$ , может быть представлена в виде

$$K_n = H(d \cdot (1 \pm \Delta_d); f_{кн} \pm \delta f_{кн}) \pm \frac{\Delta_{кп}}{100}. \quad (2.15)$$

Погрешность блока программной модели электрической сети с фликером обусловлена шагом её расчета и определяется как

$$\Delta_1 = \frac{\sin(\omega \cdot t)}{2}, \quad (2.16)$$

где  $\omega=314$  – угловая частота, рад/с;  $t=10^{-5}$  – дискретность модели, с.

Частоту колебаний напряжения можно рассчитать по выражению

$$f_{кн} \pm \delta f_{кн} = \frac{1}{T \pm t}, \quad (2.17)$$

где  $\delta f_{кн}$  – абсолютная погрешность, вносимая аппаратно-программным комплексом в результаты моделирования частоты повторения колебаний напряжения, Гц;  $T$  – период колебаний напряжения, с;  $t$  – дискретность модели, с.

Наибольшее значение  $\delta f_{кн}$  обусловлено величиной шага расчета модели  $t$ . Поэтому при частоте сетевого напряжения 50 Гц частота колебаний напряжения определяется по выражению (2.15)

$$f_{кн} \pm \delta f_{кн} = \frac{1}{0,02 \pm 0,00001} = 50 \pm 0,025 \text{ Гц.}$$

Значения погрешности, вносимой модулями АЦП и ЦАП платы ввода-вывода PCI L-783М в результаты измерений, могут быть определены по величине разрядности этих модулей, которая составляет 12 бит. При этом значение относительной погрешности блоков 2, 5 и 6 (см. рисунок 2.11) определяются по выражению

$$\Delta_2 = \Delta_5 = \Delta_6 = \frac{\delta}{2 \cdot U_{max}} \cdot 100\%, \quad (2.18)$$

где  $U_{max}$  – максимальное входное напряжение АЦП или выходное напряжение ЦАП.

Дискретность сигналов АЦП и ЦАП может быть определена по выражению

$$\delta = \frac{U_0}{2^b}, \quad (2.19)$$

где  $U_0$  – опорное напряжение АЦП или ЦАП, В;  $b$  – разрядность, бит.

Погрешность, вносимая управляемым источником питания в результаты измерений, складывается из погрешностей входящих в его состав усилителя  $\Delta_{ууип}$ , повышающего трансформатора 40В/220В  $\Delta_{ТР}$  и лабораторного вольтметра  $\Delta_{ЛВ}$ :

$$\Delta_3 = \Delta_{ууип} + \Delta_{ТР} + \Delta_{ЛВ} . \quad (2.20)$$

Значение погрешности, вносимой усилителем в результаты измерений,  $\Delta_{ууип}$  определяется значением его коэффициента искажения сигнала, который для выбранной модели усилителя TDA7293 не превышает 0,1% [107].

Величина максимальной относительной погрешности применения повышающего трансформатора 40В/220В определена путем получения его передаточной характеристики (см. таблицу 2.16).

Погрешность фотоприёмника может быть обусловлена его характеристикой чувствительности к длине волны поглощаемого света. Для оценки погрешности блока «усилитель – фотоприемник» была получена его передаточная

характеристика в диапазоне входных напряжений  $0,6 \div 0,75$  В с помощью лабораторного вольтметра класса точности 0.1 (см. таблицу 2.17).

Для большинства ламп изменение спектрального состава в допустимом диапазоне изменений питающего напряжения крайне мало [78]. При этом значение погрешности фотоприемника, связанное с нелинейностью его спектральной характеристики устраняется регулировкой коэффициента усиления усилителя. Таким образом, погрешность фотоприёмника полагаем равной нулю.

Таблица 2.16 – Фрагмент передаточной характеристики повышающего трансформатора 40В/220В

Входное напряжение $U_{ВХ}$ , В	Желаемое значение напряжения на выходе $U_{ВЫХ}$ , В	Фактическое значение напряжения на выходе $U_{ФВЫХ}$ , В	Относительная погрешность трансформатора $\Delta_{ТР}$ , %
9	44	43,64	0,91
18	88	87,94	0,11
27	132	131,13	0,68
36	176	175,68	0,23
45	220	219,89	0,05

Таблица 2.17 – Передаточная характеристика блока «усилитель – фотоприёмник»

Входное напряжение $U_{ВХ}$ , В	Желаемое значение напряжения на выходе $U_{ВЫХ}$ , В	Фактическое значение напряжения на выходе $U_{ФВЫХ}$ , В	Относительная погрешность трансформатора, $\Delta_4$ , %
0,4	2,13	2,13	0
0,45	2,39	2,38	0,42
0,5	2,66	2,64	0,75
0,55	2,93	2,92	0,34
0,6	3,19	3,18	0,31
0,65	3,46	3,45	0,29
0,7	3,73	3,72	0,27
0,75	4	4	0

Из таблицы 2.17 видно, что максимальное значение погрешности блока «усилитель – фотоприёмник» составляет 0,75%.

Входной преобразователь напряжения выполнен с помощью резисторов, имеющих допуск 0,1%.

Результаты оценки погрешности отдельных блоков аппаратно-программного комплекса при измерении колебаний напряжения и колебаний светового потока сведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 – Результаты оценки погрешности блоков аппаратно-программного комплекса

Наименование блока	Максимальное значение погрешности
Программная модель электрической сети с фликером	$\Delta_1=0,16 \%$ $\delta f_{кн}=0,025 \text{ Гц}$
ЦАП канала управления	$\Delta_2=0,016 \%$
Управляемый источник питания и повышающий трансформатор 40В/220В	$\Delta_3=1,2 \%$
	$\Delta_{123}=1,376 \%$
Фотоприёмник и усилитель	$\Delta_4=0,75 \%$
АЦП канала светового потока	$\Delta_5=0,016 \%$
	$\Delta_{45}=0,766 \%$
АЦП канала напряжения	$\Delta_6=0,116 \%$
Итоговая погрешность	$K_n=H(d(1\pm 0,01492);f_{кн}\pm 0,025)\pm 0,02142$

С учетом применения аппаратно-программного комплекса результаты определения погрешности коэффициента пульсации освещенности при колебаниях напряжения с параметрами  $d=1\%$  и  $f_{кн}=8,8 \text{ Гц}$  представлены в таблице 2.19.

Относительная погрешность коэффициента пульсации освещенности определена по следующему выражению

$$E_k = \pm \frac{\Delta K_n}{K_n} \cdot 100\%, \quad (2.21)$$

где  $\Delta K_n$  – абсолютная погрешность коэффициента пульсации освещенности, %.

Таблица 2.19 – Результаты определения погрешности коэффициента пульсации освещенности ламп различных типов

Тип и мощность ламп	$K_n \pm \Delta K_n, \%$	$E_k, \%$
Накаливания 60 Вт	5,554±0,104	1,8%
Люминесцентная 40 Вт	11±0,166	1,7%
Компактная люминесцентная 40 Вт	2,02±0,051	2,5%
Индукционная 15 Вт	1,134±0,038	3,3%
Светодиодная 11 Вт	0,16±0,023	14,4%

Максимальная погрешность, вызванная несовершенством аппаратной части аппаратно-программного комплекса, соответствует данным измерений светодиодных ламп. Наименьшая погрешность соответствует данным измерений люминесцентных ламп. Можно предположить, что величина погрешности, вызванная несовершенством аппаратной части аппаратно-программного комплекса, зависит от чувствительности к колебаниям напряжения ламп. Чем больше у лампы чувствительность к колебаниям напряжения в цепи её питания, тем меньше погрешность аппаратно-программного комплекса. И наоборот, чем меньше чувствительность лампы к колебаниям напряжения в цепи её питания, тем больше погрешность аппаратно-программного комплекса.

## 2.5. Выводы к главе 2

1. Разработана методика расчета параметров НЧХП ламп различных типов.
2. Выполнена регистрация колебаний светового потока ламп при заданных параметрах колебаний напряжения непосредственно в цепи их питания с помощью разработанного и созданного аппаратно-программного комплекса.
3. 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.

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

### ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ФЛИКЕРМЕТРА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ТИП ПРИМЕНЯЕМЫХ ЛАМП

В стандарте [3] для типовых испытаний фликерметров приведены параметры НЧХП, которая является обобщенной частотной характеристикой системы «вход прибора – выход блока 4» функциональной схемы фликерметра. При колебаниях напряжения, соответствующих параметрам стандартной НЧХП для ламп накаливания мощностью 60 Вт, на выходе блока 4 формируется мгновенное значение фликера  $P_{inst} = 1$  о.е., а для ламп различных типов должно формироваться другое по величине мгновенное значение фликера  $P_{inst} \neq 1$  о.е. Однако стандартная модель фликерметра этого не предусматривает. В этой связи оценка фликера ламп различных типов с использованием стандартного фликерметра выполняется некорректно.

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.

1. С использованием передаточной функции взвешивающего фильтра системы «лампа – глаз человека – мозг человека», соответствующей применяемым лампам.

2. 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.

### 3.1. Усовершенствованная модель фликерметра

Достоверная оценка фликера ламп различных типов в реальном времени может быть выполнена с использованием усовершенствованной модели фликерметра (см. рисунок 3.1).

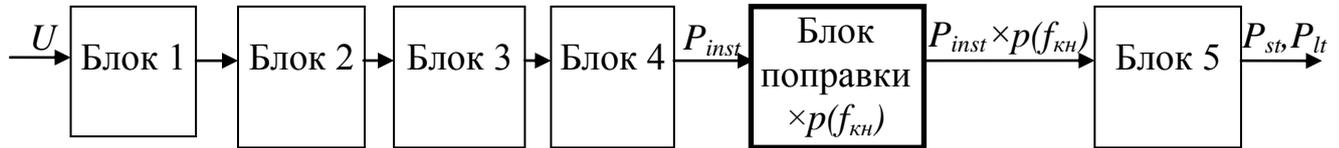


Рисунок 3.1 – Структурная схема фликерметра, учитывающая тип применяемых ламп

В соответствии с типом и мощностью применяемых ламп блоком поправки осуществляется умножение мгновенных значений фликера,  $P_{inst}$  на величину поправочного коэффициента,  $p^l(f_{кн})$ . Величина поправочного коэффициента в реальном времени рассчитывается как отношение амплитуды относительных изменений напряжения НЧХП для применяемой лампы,  $d_l(f_{кн})$  и амплитуды относительных изменений напряжения,  $d_{лн}(f_{кн})$  стандартной НЧХП [2] на срезе одной частоты,  $f_{кн}$

$$p^l(f_{кн}) = \frac{d_l(f_{кн})}{d_{лн}(f_{кн})}. \quad (3.1)$$

НЧХП для применяемой лампы предварительно определяется по методике расчета НЧХП.

Статистический анализ в блоке 5 осуществляется в порядке, описанном в требованиях [3].

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

На рисунке 3.2 изображена графическая интерпретация стандартной НЧХП и колебаний напряжения в электрической сети.

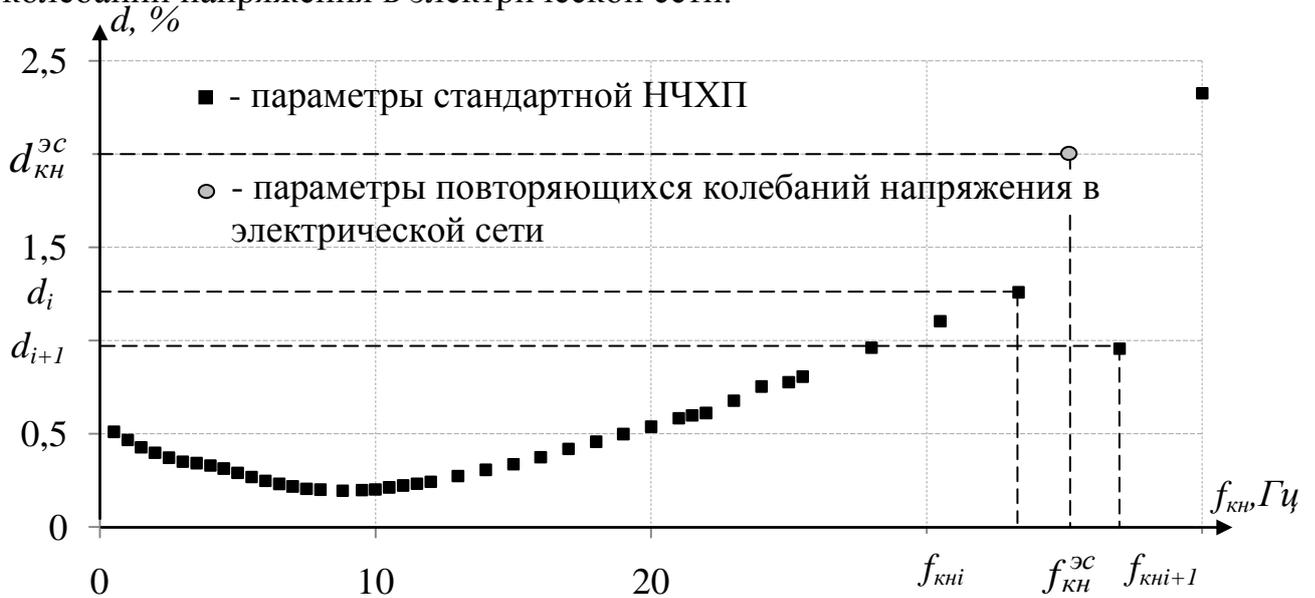


Рисунок 3.2 – Графическая интерпретация НЧХП для лампы накаливания мощностью 60 Вт и колебаний напряжения в электрической сети

Из рисунка 3.2 видно, что не представляется возможным определить соответствие колебаний напряжения в электрической сети параметрам НЧХП:  $f_{кни}$ ,  $f_{кни+1}$  и  $d_i$ ,  $d_{i+1}$ .

В этой связи необходимо описание всех рассчитанных НЧХП аналитическим способом. Это позволит в реальном времени выполнять корректировку мгновенных значений фликера во всем частотном диапазоне колебаний напряжения.

### 3.2. Аналитическое описание рассчитанных нормализованных частотных характеристик прибора

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

1. Аппроксимация НЧХП полиномом с асимптотическим графиком,  $d_i(f_{кн})$ .

Асимптотический график наблюдается у полинома следующего вида

$$d(f_{кн}) = \frac{A}{(B + f_{кн})^2 + C}, \quad (3.2)$$

где  $A$  – коэффициент полинома,  $\% \cdot \Gamma \text{ц}^2$ ;  $B$  – коэффициент полинома,  $\Gamma \text{ц}$ ;  $C$  – коэффициент полинома,  $\Gamma \text{ц}^2$ .

Выражение (3.2) удобно для применения в микроконтроллере, поскольку использует простейшие математические действия.

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

Значение  $e_i(f_{кн})$  рассчитывается по следующему выражению

$$e_i(f_{кн}) = d(f_{кн}) - d_i(f_{кн}), \quad (3.3)$$

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  $e_i(f_{кн})$  полиномом вида (3.2).

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

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

$$e_{i+1}(f_{кн}) = e_i(f_{кн}) - d_{i+1}(f_{кн}). \quad (3.4)$$

5. Проверка точности аналитического описания рассчитанной НЧХП.

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

$$e_{i+1}(f_{кн}) < 0,5\%. \quad (3.5)$$

Процедуры 3 и 4 осуществляются до выполнения условия (3.5).

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

$$d_{\Sigma}(f_{кн}) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{(B_i + f_{кн})^2 + C_i}, \quad (3.6)$$

где  $N$  – количество полиномов.

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

В рамках данной работы задавалась величина погрешности аппроксимации к НЧХП равная 0,5%.

На рисунке 3.3 представлен алгоритм аналитического описания рассчитанных НЧХП.

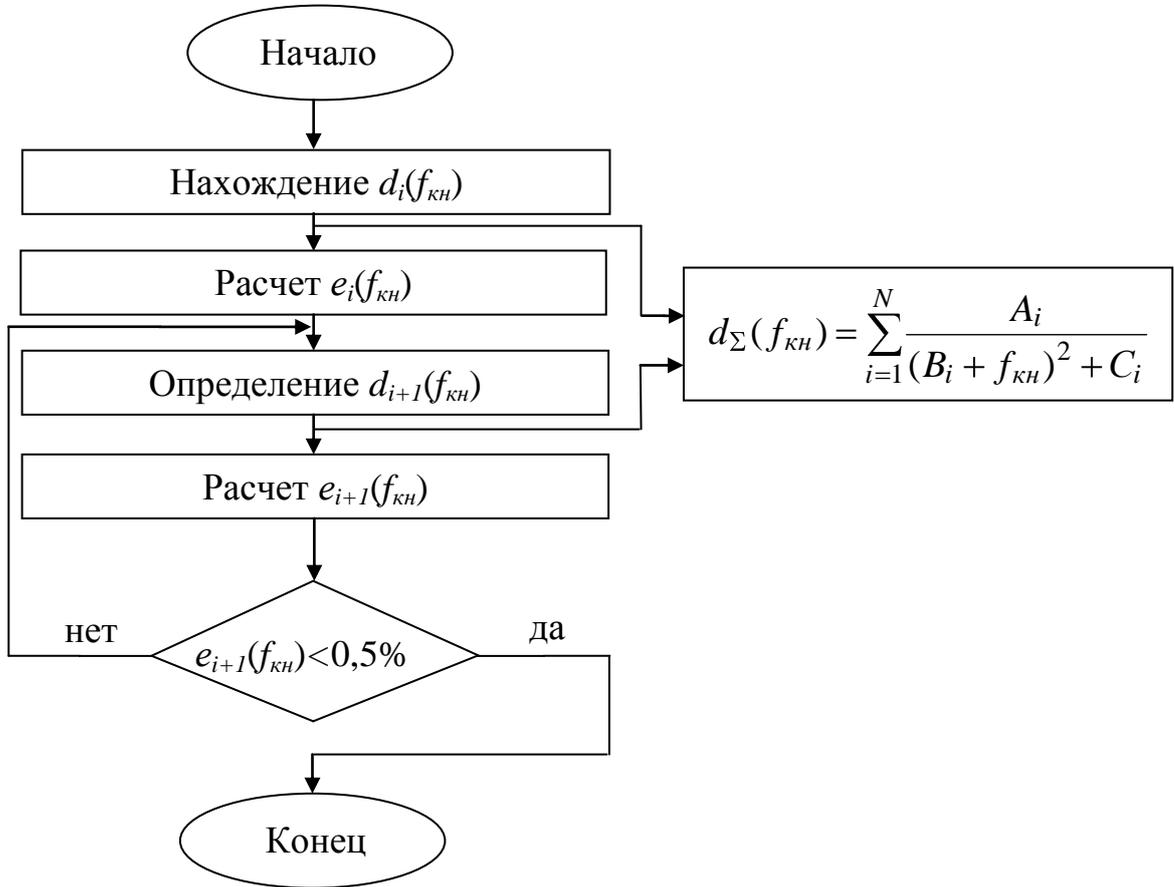


Рисунок 3.3 – Алгоритм аналитического описания рассчитанных НЧХП

Представленный на рисунке 3.3 алгоритм был использован для аналитического описания рассчитанных НЧХП.

Для аналитического описания стандартной НЧХП понадобилось 20 полиномов вида (3.2).

На рисунке 3.4 представлено графическое изображение аналитического описания стандартной НЧХП.

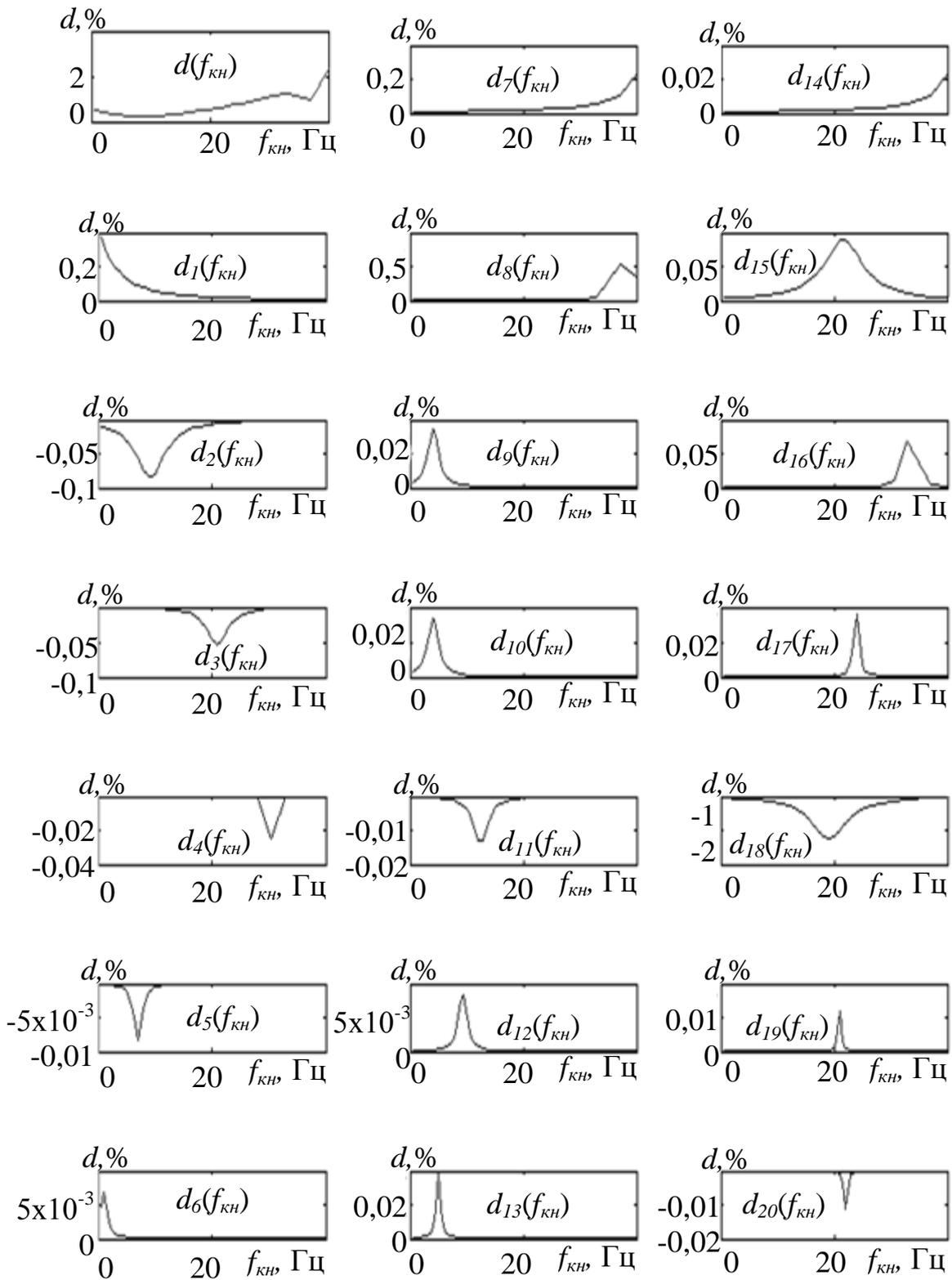


Рисунок 3.4 – Графическое изображение аналитического описания стандартной НЧХП

В таблице 3.1 приведены значения коэффициентов 20-ти полиномов, с помощью которых описывается стандартная НЧХП.

Таблица 3.1 – Коэффициенты полиномов, описывающих НЧХП для лампы  
накаливания мощностью 60 Вт

№ полинома	$A, \% \cdot \Gamma \text{ц}^2$	$B, \Gamma \text{ц}$	$C, \Gamma \text{ц}^2$
1	412	-79,47	-1380
2	52,09	-31,54	71,29
3	10,41	3,156	14,39
4	1,755	-38,23	1,753
5	1,519	-21,66	16,82
6	-0,8355	-9,166	9,882
7	0,04625	-4,116	1,332
8	0,07382	-32,86	1,053
9	-0,251	-20,91	4,603
10	0,04107	-4,109	1,208
11	0,008823	-23,91	0,2371
12	-0,005121	-30,5	0,2015
13	-0,03092	-12,46	2,114
14	-0,01872	-19,08	1,478
15	-0,005699	-7,021	0,6865
16	0,003	-9,3	0,6865
17	0,0008	-21	0,068
18	0,004	-1	0,6
19	0,0008	-5	0,2
20	-0,0011	-22	0,1

В таблице 3.2 представлены значения погрешности аналитического описания НЧХП для лампы накаливания мощностью 60.

Относительная погрешность аналитического описания НЧХП определена по выражению

$$E = \left| \frac{d - d_{\Sigma}}{d} \right| \cdot 100\% . \quad (3.7)$$

Таблица 3.2 – Значения погрешности аналитического описания НЧХП для лампы накаливания мощностью 60 Вт

$f_{кн}, \text{Гц}$	$d, \%$	$d_{\Sigma}, \%$	$E, \%$
0,5	0,51	0,5124	0,47
1	0,468	0,469	0,22
1,5	0,429	0,43	0,27
2	0,399	0,3974	0,39
2,5	0,371	0,3719	0,25
3	0,351	0,3521	0,31
3,5	0,342	0,3421	0,04
4	0,331	0,3321	0,33
4,5	0,313	0,3138	0,26
5	0,291	0,2919	0,34
5,5	0,269	0,2687	0,09
6	0,249	0,2496	0,27
6,5	0,231	0,2314	0,19
7	0,217	0,2171	0,19
7,5	0,206	0,2067	0,07
8	0,2	0,2009	0,37
8,8	0,196	0,1953	0,47
9,5	0,199	0,1981	0,33
10	0,203	0,2032	0,415
11	0,222	0,2222	0,09
12	0,244	0,2438	0,01
13	0,275	0,2754	0,06
14	0,306	0,3056	0,16
15	0,338	0,3381	0,09
16	0,376	0,3764	0,24
17	0,42	0,4198	0,1
18	0,457	0,4569	0,04
19	0,498	0,4981	0,06
20	0,537	0,5371	0,02
21	0,584	0,5833	0,09
22	0,611	0,6105	0,06
23	0,678	0,6762	0,26
24	0,753	0,7538	0,1
25	0,778	0,7774	0,07
25,5	0,806	0,8036	0,29
28	0,962	0,9621	0,1
30,5	1,105	1,1059	0,08
33,3	1,258	1,2554	0,19
37	0,957	0,9587	0,18
40	2,327	2,3323	0,22

Графическая интерпретация данных таблицы 3.2 представлена на рисунке 3.5.

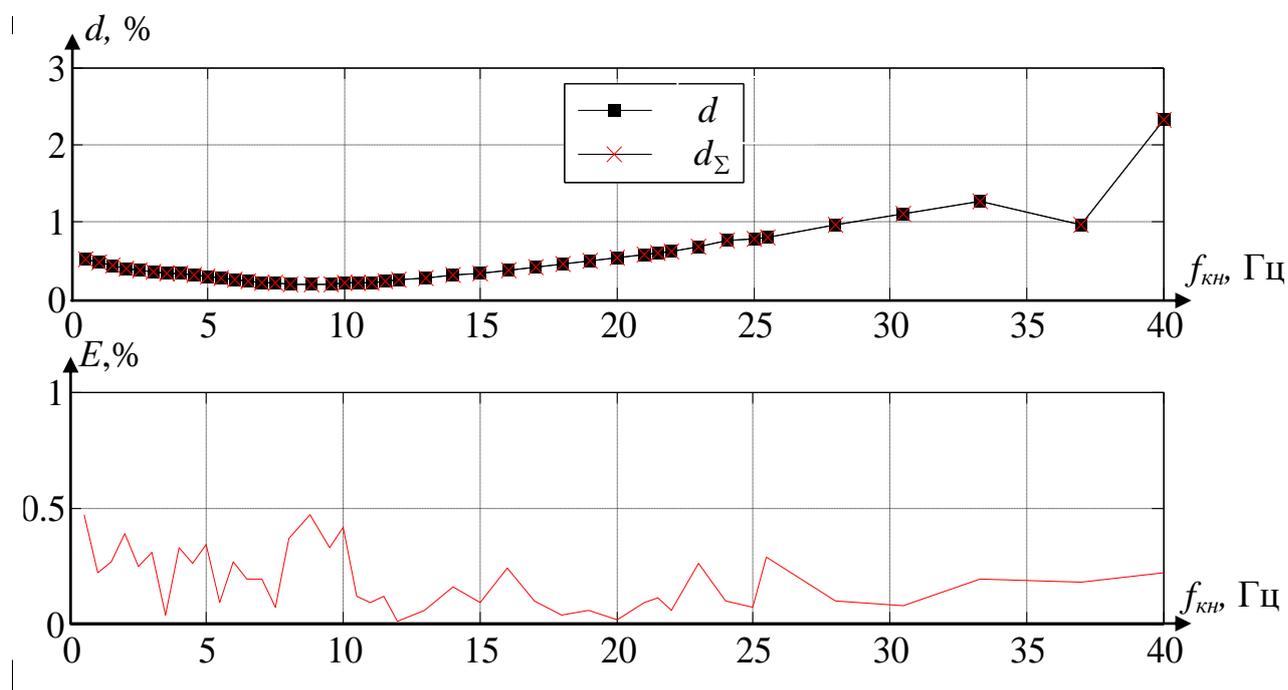


Рисунок 3.5 – Графическое изображение результатов аналитического описания НЧХП для лампы накаливания мощностью 60 Вт

Методика аналитического описания рассчитанных НЧХП была использована для аналитического описания НЧХП для ламп других типов.

Коэффициенты полиномов, описывающих НЧХП люминесцентной лампы мощностью 40 Вт, представлены в таблице 3.3, компактной люминесцентной лампы мощностью 40 Вт – в таблице 3.5, индукционной лампы мощностью 15 Вт – в таблице 3.7, светодиодной лампы мощностью 11 Вт – в таблице 3.9.

Значения погрешности аналитического описания НЧХП для люминесцентной лампы мощностью 40 Вт представлены в таблице 3.4, компактной люминесцентной лампы мощностью 40 Вт – в таблице 3.6, индукционной лампы мощностью 15 Вт – в таблице 3.8, светодиодной лампы мощностью 11 Вт – в таблице 3.10.

Графическая интерпретация данных таблиц 3.4, 3.6, 3.8, 3.10 представлена на рисунках 3.6÷3.8.

Таблица 3.3 – Коэффициенты полиномов, описывающих НЧХП для люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

№ полинома	$A, \% \cdot \Gamma\text{ц}^2$	$B, \Gamma\text{ц}$	$C, \Gamma\text{ц}^2$
1	32,42	8,413	48,34
2	41,2	-32,84	68,57
3	1,619	-21,88	25,05
4	0,0242	-40	0,03
5	-1,637	-8,037	23,68
6	0,03267	-28,76	-3,97
7	0,8705	-9,167	10,44
8	-0,04647	-1,659	1,969
9	0,1275	-17,44	6,656
10	0,02593	-28,91	-3,25
11	-0,004116	0,6649	-0,9756
12	-0,0009247	-2,799	0,1175
13	0,002683	-4,402	0,5304
14	-0,02448	-30,37	-42,16
15	-0,001912	-22,22	0,1882
16	-0,004387	-11,24	1,514
17	0,0006004	-1,196	0,3406
18	0,000653	-6,639	1,561
19	-0,006551	-0,3414	15,07
20	0,003654	8,13	-78,5

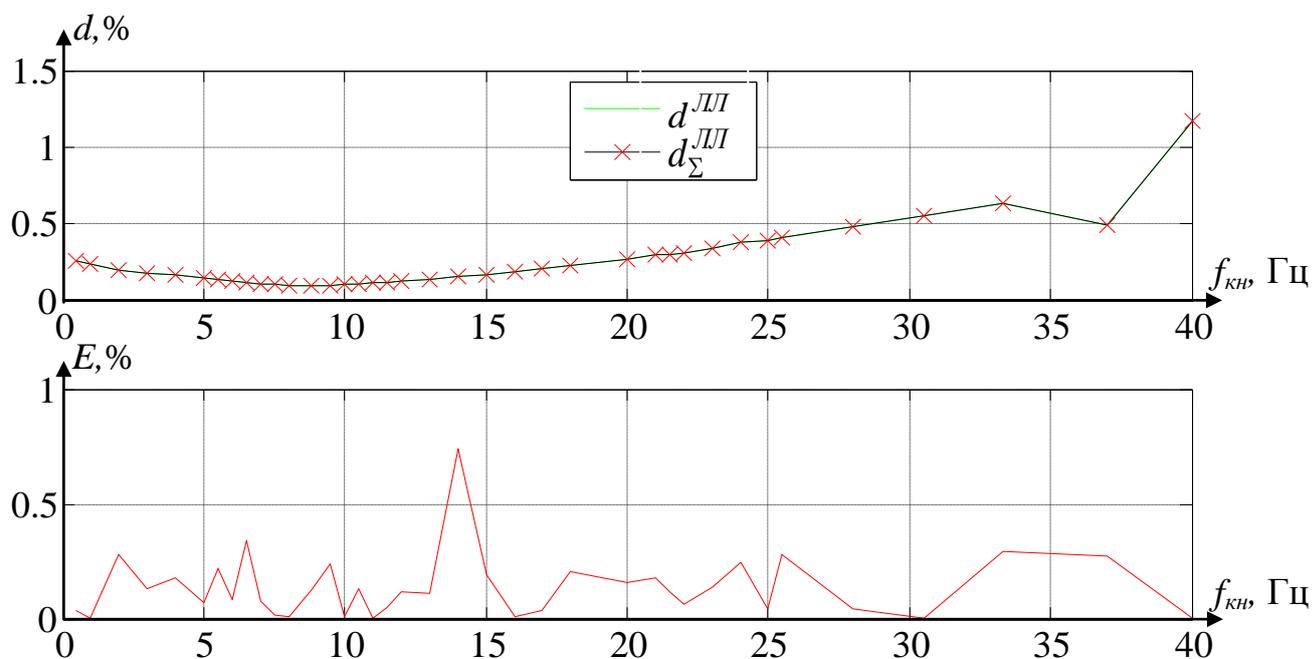


Рисунок 3.6 – Графическое изображение результатов аналитического описания НЧХП для люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

Таблица 3.4 – Значения погрешности аналитического описания НЧХП для люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

$f_{кн}$ , Гц	$d^{III}$ , %	$d_{\Sigma}^{III}$ , %	$E$ , %
0,5	0,259	0,2589	0,035
1	0,237	0,2371	0,004
2	0,202	0,2014	0,28
3	0,178	0,1777	0,13
4	0,168	0,1677	0,178
5	0,147	0,1468	0,069
5,5	0,136	0,1356	0,222
6	0,126	0,1258	0,086
6,5	0,117	0,1165	0,344
7	0,11	0,1099	0,078
7,5	0,104	0,1039	0,014
8	0,101	0,1009	0,012
8,8	0,099	0,0988	0,124
9,5	0,101	0,1007	0,241
10	0,103	0,1031	0,009
10,5	0,107	0,1071	0,133
11	0,112	0,1119	0,001
11,5	0,118	0,1179	0,05
12	0,123	0,1231	0,119
13	0,139	0,1388	0,109
14	0,155	0,1538	0,741
15	0,171	0,1706	0,194
16	0,19	0,1899	0,008
17	0,212	0,2118	0,04
18	0,231	0,2314	0,207
20	0,271	0,27	0,162
21	0,294	0,2945	0,178
21,5	0,302	0,3023	0,115
22	0,308	0,3082	0,066
23	0,342	0,3415	0,14
24	0,379	0,378	0,249
25	0,392	0,3918	0,044
25,5	0,406	0,4071	0,279
28	0,484	0,4838	0,043
30,5	0,556	0,5559	0,003
33,33	0,632	0,6301	0,296
37	0,489	0,4876	0,275
40	1,167	1,167	0,00001

Таблица 3.5 – Коэффициенты полиномов, описывающих НЧХП для компактной люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

№ полинома	$A, \% \cdot \Gamma\text{ц}^2$	$B, \Gamma\text{ц}$	$C, \Gamma\text{ц}^2$
1	164,5	7,781	50,63
2	209	-31,88	62,47
3	4,659	-45,46	-28,79
4	-6,328	-7,814	18,68
5	-0,2457	-1,643	1,805
6	4,502	-19,6	15,53
7	-0,013	-2,807	0,209
8	-0,2413	-10,78	4,443
9	-0,2403	-29,32	-0,7634
10	1,404	-37,3	12,55
11	-0,017	-23,44	-0,465
12	0,01	-16,6	0,237
13	0,0026	-21,25	0,039
14	-0,0189	-29,4	-0,465
15	-1,525	34,52	-1148
16	0,0324	-2,34	3,273
17	0,0026	-4,616	0,199
18	0,0022	-14,55	0,1189
19	0,0018	-19,49	-0,424
20	-0,0054	-34,41	-1,489

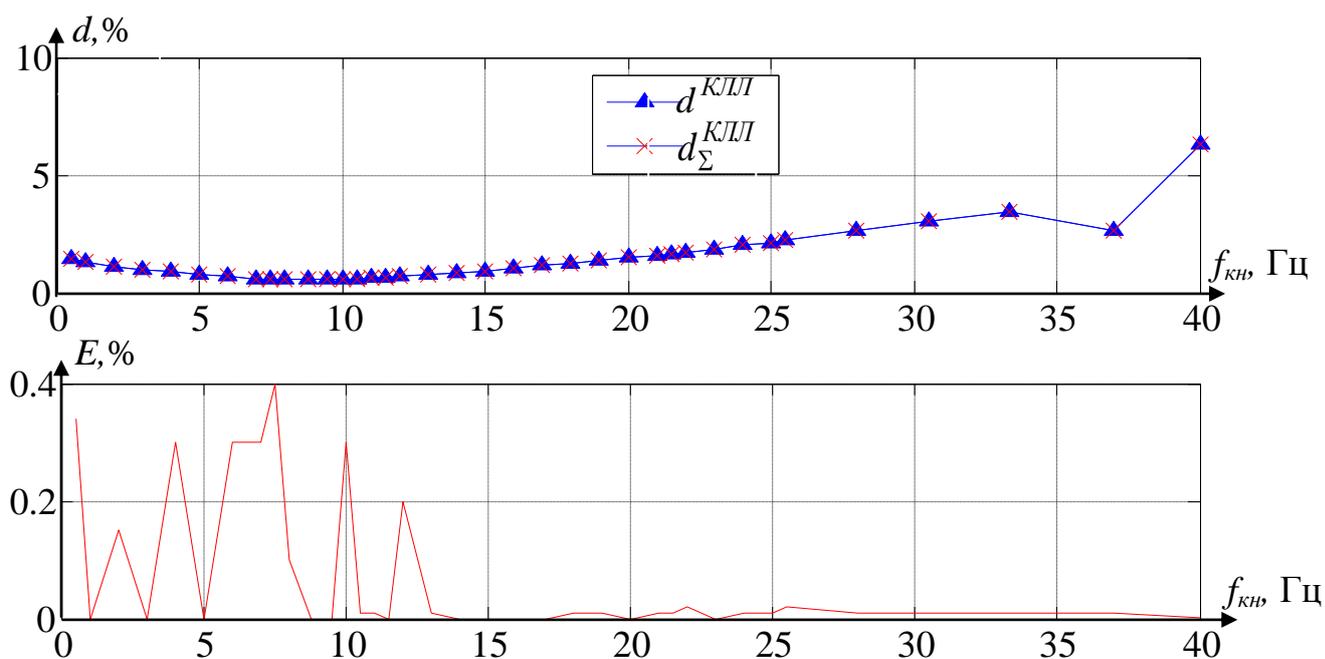


Рисунок 3.7 – Графическое изображение результатов аналитического описания НЧХП для компактной люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

Таблица 3.6 – Значения погрешности аналитического описания НЧХП для компактной люминесцентной лампы мощностью 40 Вт

$f_{кн}$ , Гц	$d^{КЛЛ}$ , %	$d_{\Sigma}^{КЛЛ}$ , %	$E$ , %
0,5	1,404	1,408	0,34
1	1,288	1,288	0
2	1,098	1,093	0,15
3	0,966	0,966	0
4	0,91	0,907	0,3
5	0,8	0,8	0
6	0,684	0,685	0,3
7	0,596	0,598	0,3
7,5	0,566	0,568	0,4
8	0,549	0,548	0,1
8,8	0,538	0,538	0
9,5	0,546	0,546	0
10	0,557	0,559	0,3
10,5	0,582	0,581	0,01
11	0,609	0,608	0,01
11,5	0,639	0,639	0
12	0,67	0,677	0,2
13	0,754	0,755	0,01
14	0,839	0,839	0
15	0,927	0,927	0
16	1,031	1,031	0
17	1,151	1,151	0
18	1,252	1,253	0,01
19	1,364	1,363	0,01
20	1,47	1,47	0
21	1,598	1,597	0,01
21,5	1,642	1,641	0,01
22	1,672	1,67	0,02
23	1,855	1,855	0
24	2,059	2,058	0,01
25	2,127	2,125	0,01
25,5	2,203	2,208	0,02
28	2,628	2,627	0,01
30,5	3,016	3,015	0,01
33,33	3,431	3,43	0,01
37	2,656	2,657	0,01
40	6,634	6,33	0,001

Таблица 3.7 – Коэффициенты полиномов, описывающих НЧХП для индукционной лампы мощностью 15 Вт

№ полинома	$A, \% \cdot \Gamma\text{ц}^2$	$B, \Gamma\text{ц}$	$C, \Gamma\text{ц}^2$
1	863,2	-54,9	-145,1
2	82,04	2,183	31,11
3	63,94	-24,1	25,15
4	27,24	-32,1	8,348
5	-2,562	-23,23	4,78
6	1,019	-38,67	-3,52
7	1,684	-17,3	6,159
8	-3,491	-8,29	10,18
9	-0,5243	-22,69	2,143
10	-0,0551	-2,32	0,07848
11	-0,002519	-1,076	-0,1695
12	-0,5219	-22,7	2,128
13	0,07019	-3,002	0,3267
14	0,3846	-15,53	4,539

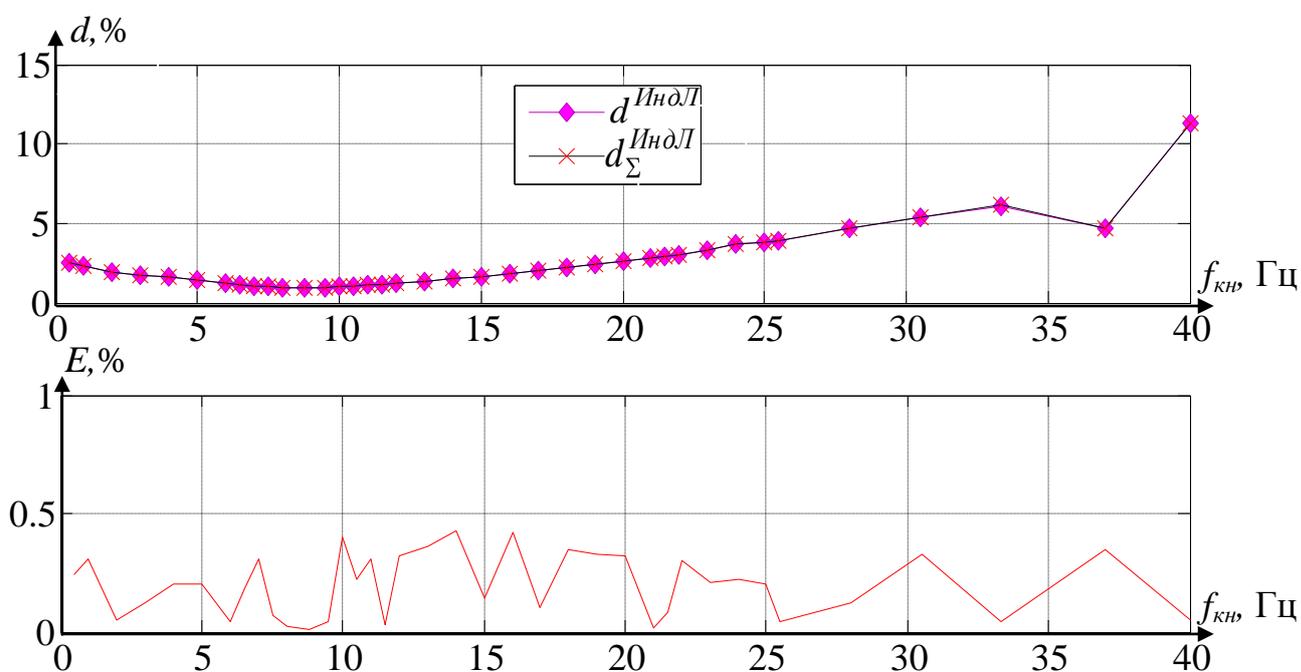


Рисунок 3.8 – Графическое изображение результатов аналитического описания НЧХП для индукционной лампы мощностью 15 Вт

Таблица 3.8 – Значения погрешности аналитического описания НЧХП для индукционной лампы мощностью 15 Вт

$f_{кн}, Гц$	$d^{ИндЛ}, \%$	$d_{\Sigma}^{ИндЛ}, \%$	$E, \%$
0,5	2,503	2,51	0,24
1	2,2972	2,29	0,31
2	1,958	1,957	0,05
3	1,7219	1,724	0,12
4	1,6234	1,62	0,2
5	1,4268	1,43	0,2
6	1,2205	1,22	0,04
6,5	1,1321	1,13	0,18
7	1,0633	1,06	0,31
7,5	1,0093	1,01	0,07
8	0,9798	0,98	0,02
8,8	0,9599	0,96	0,01
9,5	0,9744	0,974	0,04
10	0,9939	0,99	0,4
10,5	1,0378	1,04	0,22
11	1,0866	1,09	0,31
11,5	1,1403	1,14	0,03
12	1,1939	1,19	0,32
13	1,3452	1,35	0,36
14	1,4964	1,49	0,43
15	1,6524	1,65	0,145
16	1,8377	1,83	0,42
17	2,0521	2,05	0,1
18	2,2323	2,24	0,35
19	2,4319	2,44	0,33
20	2,6515	2,66	0,32
21	2,8505	2,85	0,017
21,5	2,9278	2,93	0,08
22	2,9811	2,99	0,3
23	3,307	3,3	0,21
24	3,6718	3,68	0,22
25	3,7926	3,8	0,2
25,5	3,9285	3,93	0,04
28	4,6855	4,68	0,12
30,5	5,3781	5,36	0,33
33,33	6,1177	6,12	0,04
37	4,73	4,72	0,346
40	11,294	11,3	0,05

Таблица 3.9 – Коэффициенты полиномов, описывающих НЧХП для светодиодной лампы мощностью 11 Вт

№ полинома	$A, \% \cdot \text{Гц}^2$	$B, \text{Гц}$	$C, \text{Гц}^2$
1	5081	-32,65	126
2	100,9	-0,3876	8,234
3	43,44	-44,31	-17,75
4	-18,67	-9,99	9,394
5	2,07	-4,388	1,038
6	50,13	-41,15	-36,54
7	-32,95	-29,01	15,22
8	6,717	-19,03	7,323

Таблица 3.10 – Значения погрешности аналитического описания НЧХП для светодиодной лампы мощностью 11 Вт

$f_{кв}$ , Гц	$d^{LED}, \%$	$d_{\Sigma}^{LED}, \%$	$E, \%$
1	2	3	4
0,5	17,679	17,6	0,44
1	16,221	16,2	0,13
2	13,825	13,83	0,04
3	12,159	12,2	0,33
4	11,463	11,5	0,33
5	10,074	10,1	0,26
6	8,618	8,6	0,2
6,5	7,994	8,01	0,2
7	7,508	7,5	0,1
7,5	7,127	7,1	0,38
8	6,918	6,9	0,26
8,8	6,778	6,8	0,32
9,5	6,88	6,9	0,29
10	7,018	7,05	0,45
10,5	7,328	7,3	0,38
11	7,672	7,68	0,1
11,5	8,05	8,09	0,49
12	8,43	8,4	0,35
13	9,498	9,5	0,02
14	10,56	10,58	0,19
15	11,67	11,65	0,171
16	12,97	13	0,23
17	14,49	14,56	0,48

Продолжение таблицы 3.10

1	2	3	4
18	15,76	15,71	0,32
19	17,17	17,1	0,4
20	18,51	18,6	0,48
21	20,13	20,14	0,05
21,5	20,67	20,64	0,14
22	21,05	21,02	0,14
23	23,35	23,29	0,25
24	25,92	25,9	0,07
25	26,78	26,8	0,07
25,5	27,74	27,79	0,18
28	33,08	33,1	0,06
30,5	37,98	38,1	0,06
33,33	43,19	43,25	0,14
37	33,44	33,5	0,18
40	79,75	79,56	0,24

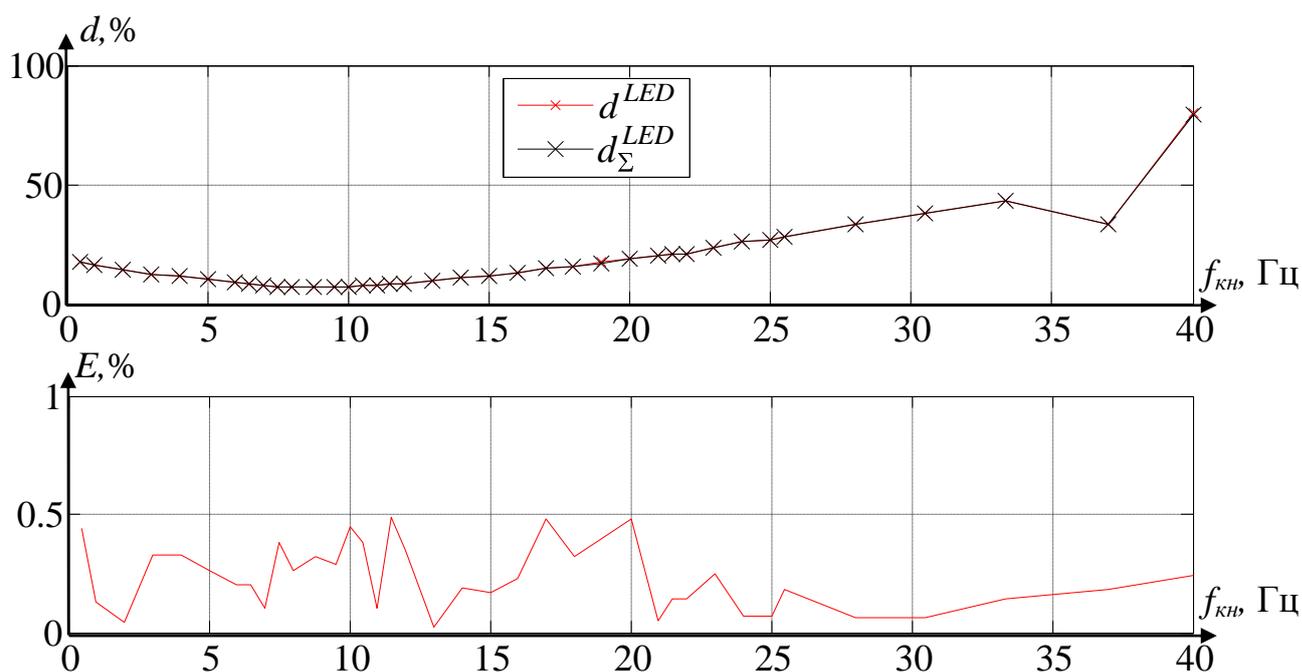


Рисунок 3.9 –Графическое изображение результатов аналитического описания НЧХП для светодиодной лампы мощностью 11 Вт

Из таблиц 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10 видно, что погрешность аналитического описания НЧХП ламп различных типов не превысила 0,5 %.

Коэффициенты полиномов, представленные в таблицах 3.1, 3.3, 3.5, 3.7 и 3.9, могут быть использованы для аналитического описания НЧХП ламп различных типов. Аналитически описанные НЧХП позволяют аппаратно реализовать блок поправки с помощью недорогих микроконтроллеров.

### **3.3. Выводы к главе 3**

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

2. Аналитическое описание рассчитанных НЧХП выполнено суммой простых полиномов с помощью функционального средства Basic Fitting прикладного пакета программ MatLab методом последовательных приближений.

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

## **ГЛАВА 4. ВЫБОР МЕРОПРИЯТИЙ ПО НОРМАЛИЗАЦИИ ФЛИКЕРА**

Результаты исследований [6, 18, 19, 51, 52, 54] свидетельствуют о том, что уровни фликера в электрических сетях могут достигать высоких значений и, в некоторых случаях, превышать нормируемые действующими стандартами [8, 20÷22] величины.

В общем случае, 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.

### **4.1. Методика по нормализации фликера посредством замены ламп**

В составе применяемых источников света возможно присутствие ламп с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети. В этом случае, у менее чувствительных к колебаниям напряжения ламп уровень фликера может находиться в норме, а у более чувствительных к колебаниям напряжения ламп – превышать предельные значения.

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 чувствительных к колебаниям напряжения в электрической сети ламп на менее чувствительные лампы.

Нормализация фликера посредством замены ламп должна производиться по разработанной методике, 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. Полученные НЧХП для дальнейшего использования в усовершенствованной модели фликерметра описываются аналитически суммой полиномов методом последовательных приближений. 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  $P_{st}$  осуществляется одним из следующих способов:

- стандартными методами совместно с методикой определения поправочных коэффициентов;
- применением усовершенствованной модели фликерметра.

4. Оценка фликера.

Выполняется проверка следующего условия

$$P_{st} < 1 \text{ о.е.} \quad (4.1)$$

В случае выполнения условия (4.1) замена источников света не требуется.

Если условие (4.1) не выполняется для всех групп источников света, требуется 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.

В случае превышения уровня фликера у всех выделенных групп источников света требуется проведение мероприятий по снижению колебаний напряжения в электрической сети.

На рисунке 4.1 представлен алгоритм замены источников света для нормализации фликера.

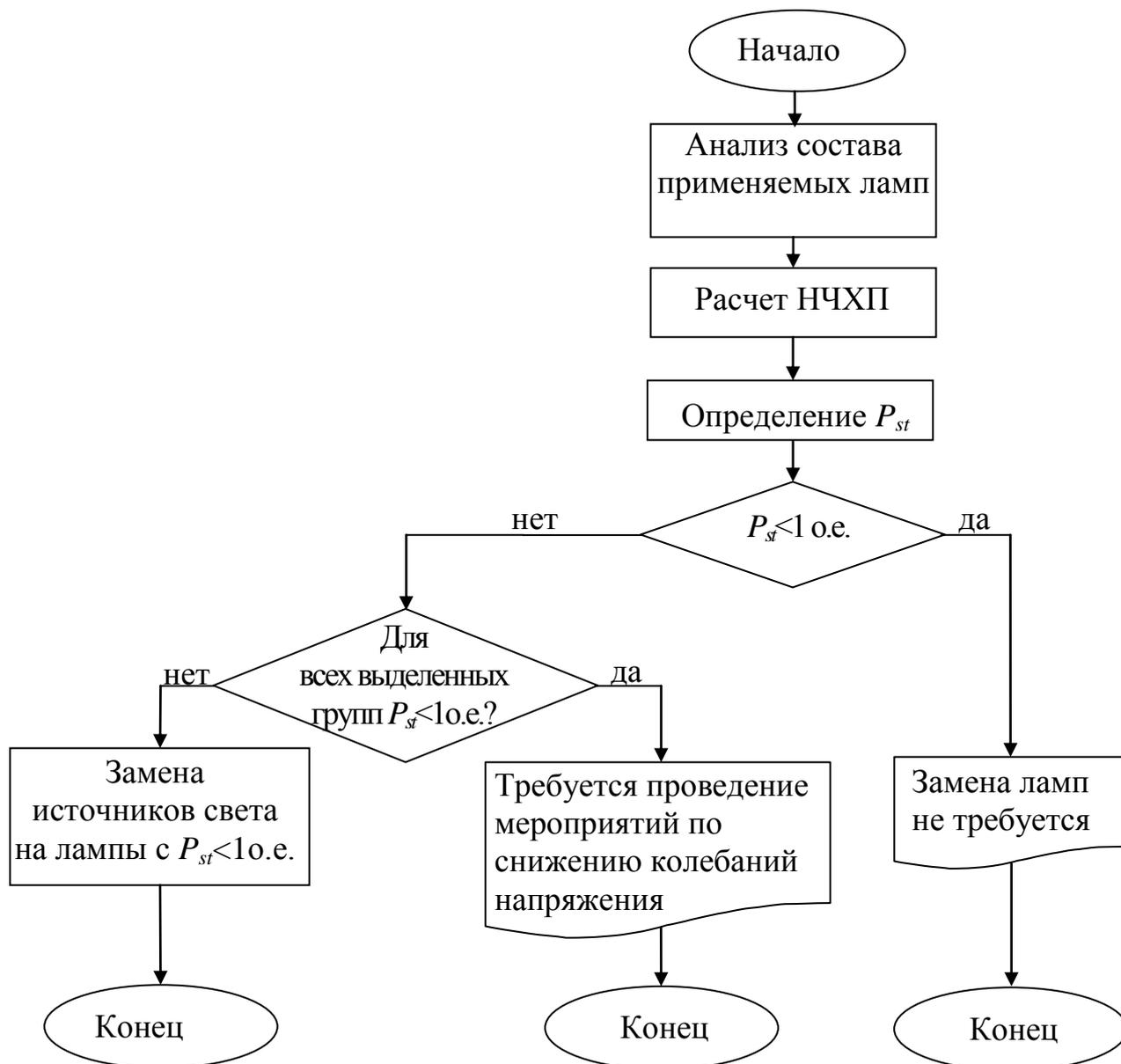


Рисунок 4.1 –Алгоритм замены ламп для нормализации фликера

Методика по нормализации фликера посредством замены ламп использована в общежитии санатория-профилактория БрГУ. В соответствии с ней последовательно выполнены следующие процедуры:

### 1. Анализ состава применяемых ламп.

В общежитии для освещения помещений использовались люминесцентные лампы мощностью 40 Вт, лампы накаливания мощностью 60 Вт и компактные люминесцентные лампы мощностью 15 Вт.

Для сопоставления уровней фликера, возникающих при колебаниях напряжения в электрической сети общежития, в состав источников света вводились лампы, исследованные в главе 2 данной диссертационной работы.

### 2. Расчет НЧХП для применяемых ламп.

НЧХП выделенных групп источников света получены во второй главе данной диссертационной работы.

### 3. Определение уровней фликера.

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

В таблице 4.1 представлены результаты расчета фактических уровней фликера для каждой выделенной группы источников света.

Таблица 4.1 – Результаты расчета фактических уровней фликера

Тип и мощность ламп	Поправочный коэффициент $p^l$ , 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

### 4. Оценка фликера.

По данным таблицы 4.1 видно превышение допустимой величины  $P_{st}=1$  о.е. у люминесцентных ламп и ламп накаливания. В этой связи предложена их замена на компактные люминесцентные, индукционные или светодиодные лампы.

### 5. Замена ламп.

Выполнена замена люминесцентных ламп и ламп накаливания на светодиодные в связи с тем, что у последних расчетный уровень фликера наименьший.

## 4.2. Нормализация фликера посредством снижения колебаний напряжения в электрической сети

В общем случае, уровни колебаний напряжения в электрической сети, приводящие к возникновению фликера у ламп различных типов, могут быть определены с помощью соответствующих НЧХП.

Уровни колебаний напряжения, вызванные работой электрической нагрузки, в проектируемой электрической сети могут быть определены расчетными методами. В действующей электрической сети – расчетными методами или методом измерения.

Выбор мероприятий по нормализации фликера ламп различных типов посредством оценки колебаний напряжения в электрической сети на этапах её проектирования и эксплуатации требует разработки соответствующих методик.

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

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 для применяемых ламп.

Методика по нормализации фликера на основе данных расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети предполагает процедуры, выполняемые в следующем порядке:

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

Выделяется группа ламп с наибольшим уровнем фликера,  $P_{stmax}$ . Выполняется оценка соответствия значения  $P_{stmax}$  нормам фликера [8].

В случае нахождения  $P_{stmax}$  в пределах норм проведение мероприятий по снижению колебаний напряжения в электрической сети не требуется.

4. Определение уровня колебаний напряжения, соответствующего точке минимума НЧХП для 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% [3].

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

Расчет  $d_{max}$  выполняется по результатам использования стандартных методов, приведенных в [8].

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

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

$$\Delta d = d_{max} - d_{min}. \quad (4.2)$$

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

Стандартные методы, приведенные в [8], 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 по нормализации фликера  $d_{max}$  не должна превышать минимального значения  $d_{min}$ . В случае использования ламп накаливания мощностью 60 Вт должно выполняться следующее условие:

$$d_{max} < d_{min}^{нн} = 0,196\%. \quad (4.3)$$

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

$$d_{max} < d_{min}^л = \frac{d_{min}^{нн}}{p^л}. \quad (4.4)$$

Если  $d_{max} > d_{min}$ , то по формуле (4.2) необходимо рассчитать  $\Delta d$  и провести другие мероприятия по снижению колебаний напряжения в электрической сети.

На рисунке 4.2 представлен алгоритм методики по нормализации фликера посредством расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

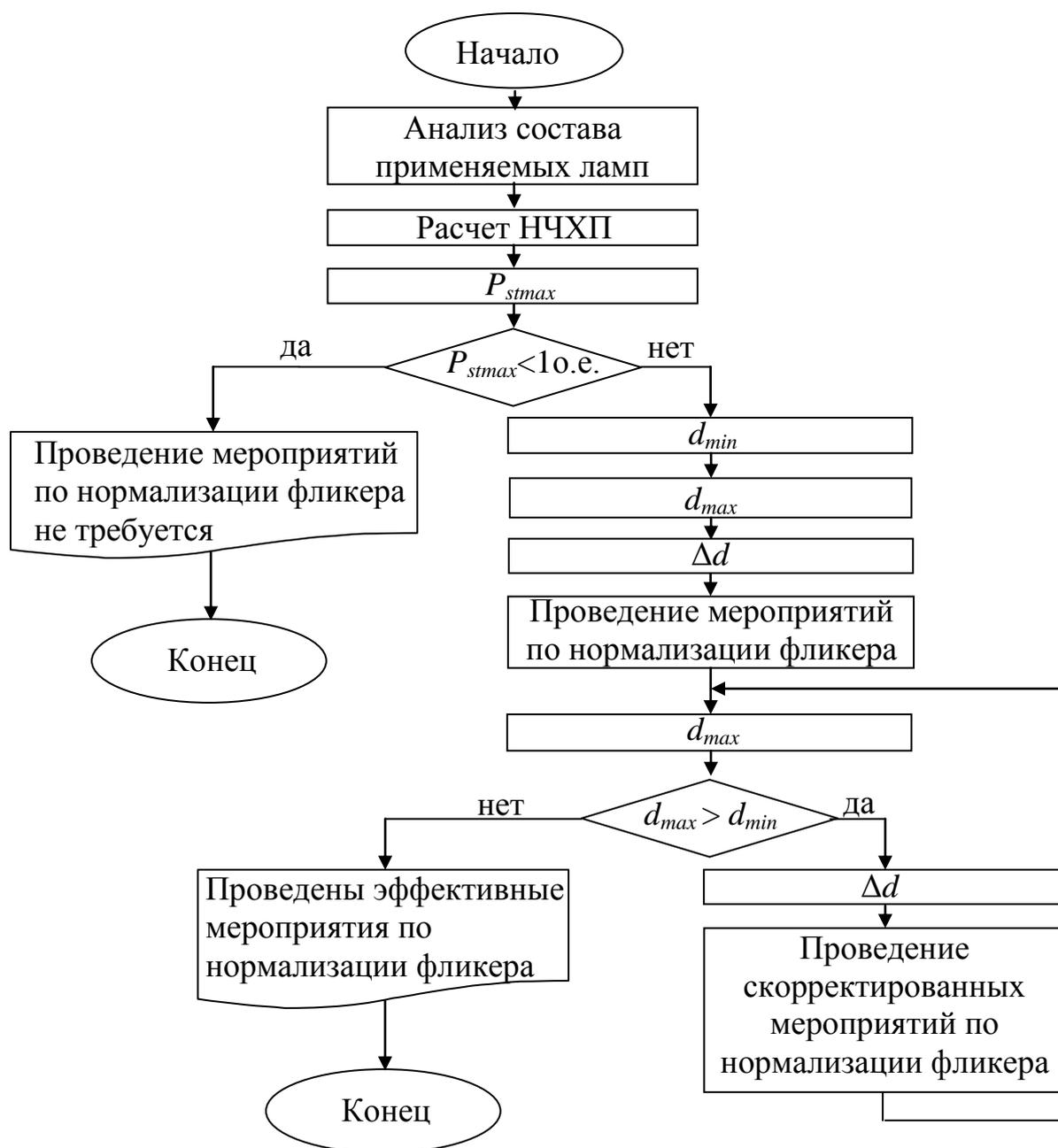


Рисунок 4.2 –Алгоритм методики по нормализации фликера на основе данных расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети

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.

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

Административный корпус завода получает питание от двухтрансформаторной подстанции с установленными на ней трансформаторами ТМ-1000/10 (см. рисунок 4.3). Эти трансформаторы имеют связь с распределительным пунктом №1 (РП-1 подстанция «Заводская») (см. рисунок 4.4) [92, 93].

Помещения административного корпуса относятся к категории помещений, где требуется значительное зрительное напряжение. Кратковременная доза фликера не должна превышать значения 1,0 о.е. [8].

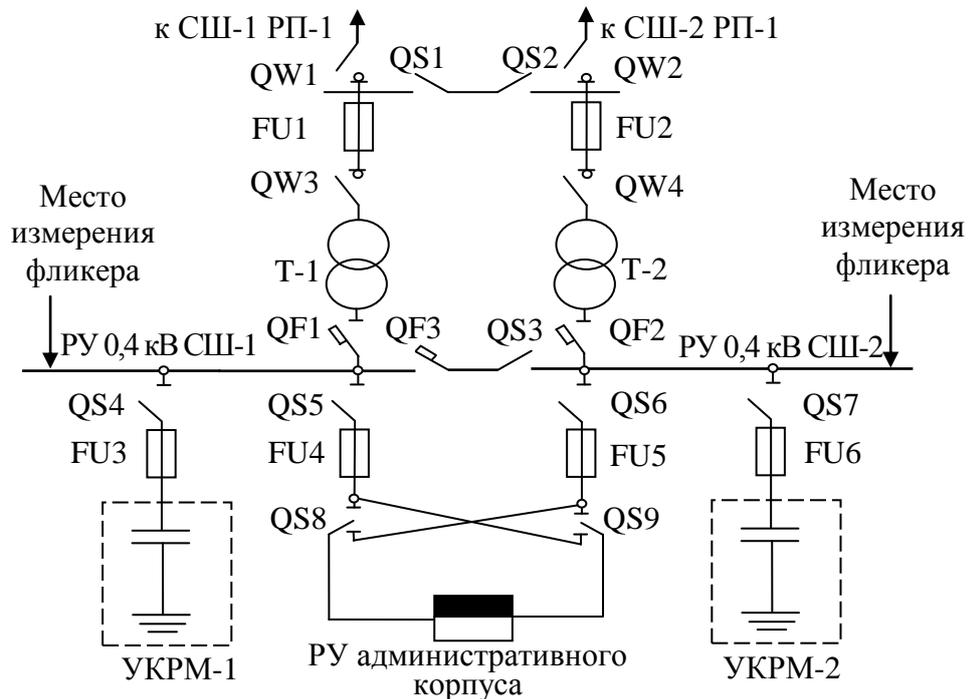


Рисунок 4.3 – СЭС административного корпуса завода

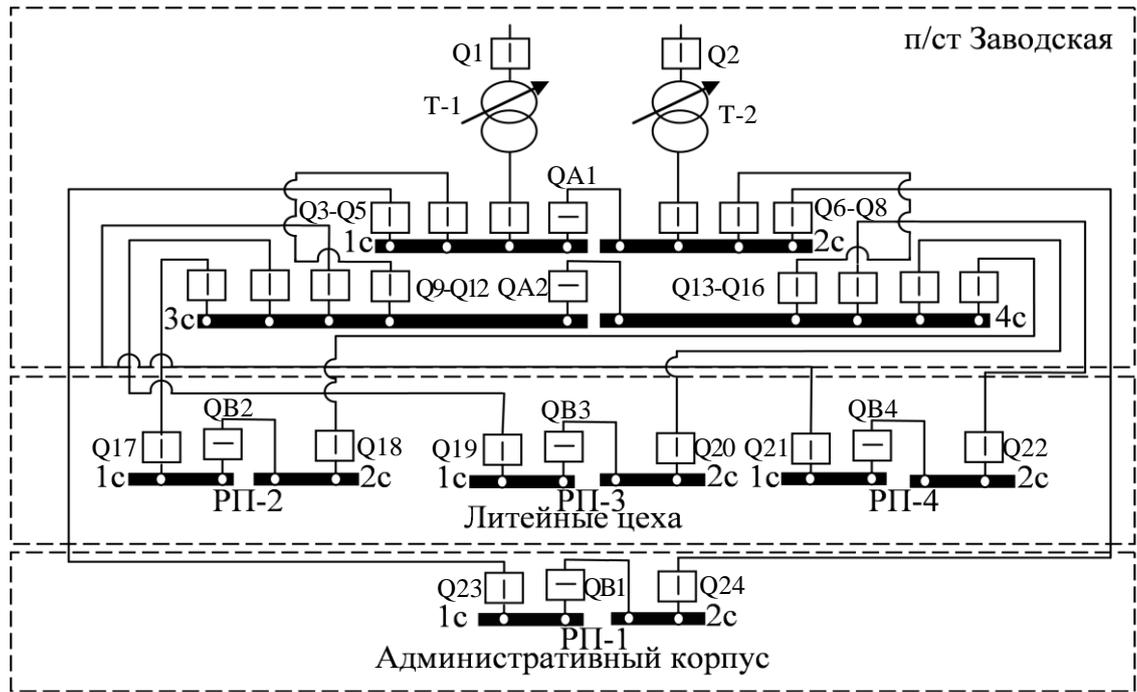


Рисунок 4.4 – Схема электрических соединений завода  
литейного производства

Особенностью схемы является питание нагрузок с постоянным и резкопеременным режимами работы от одной понизительной подстанции, что является типовым решением для многих промышленных предприятий [51, 52].

Причиной возникновения колебаний напряжения в СЭС административного корпуса завода является работа дуговых сталеплавильных печей, получающих питание от распределительных пунктов РП-2, РП-3 и РП-4. Перечисленные распределительные пункты имеют связь с подстанцией «Заводская».

В соответствии с методикой по нормализации фликера посредством расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети последовательно выполнялись следующие процедуры:

1. Анализ состава применяемых ламп.

В составе источников света, используемых в административном корпусе завода, были выделены люминесцентные лампы мощностью 40 Вт и лампы накаливания мощностью 60 Вт. Для сопоставления необходимых мероприятий по нормализации фликера было рассмотрено использование ламп, исследованных в главе 2 данной диссертационной работы.

2. Расчет НЧХП ламп различных типов выполнен в главе 2 данной диссертационной работы.

3. Оценка фликера.

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

График измеренной  $P_{st}$  в СЭС административного корпуса завода представлен на рисунке 4.5.

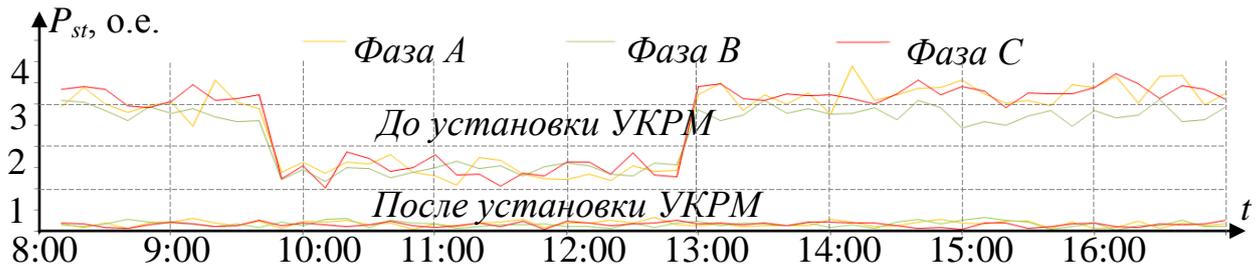


Рисунок 4.5 – График измеренной  $P_{st}$  в СЭС административного корпуса завода

На рисунке 4.6 представлено графическое изображение исходных данных для определения требуемой величины снижения колебаний напряжения в электрической сети.

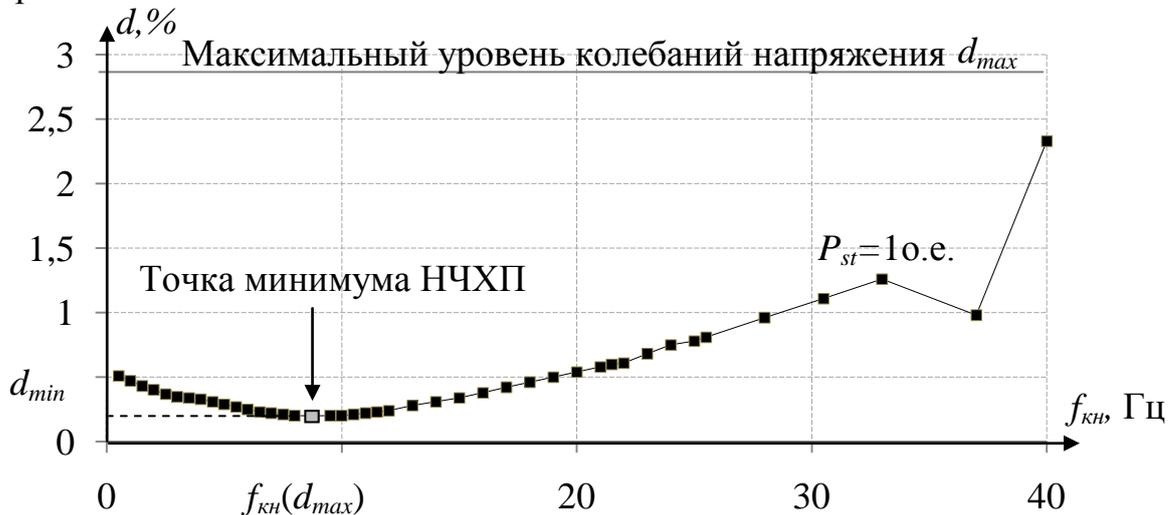


Рисунок 4.6 – Графическое изображение исходных данных для определения требуемой величины снижения колебаний напряжения в электрической сети

В таблице 4.2 представлены результаты расчета наибольших уровней фликера для ламп различных типов.

Таблица 4.2 – Результаты расчета наибольших уровней фликера для ламп различных типов

Тип и мощность ламп	Поправочный коэффициент $p^l$ , 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 [8] уровней фликера у ламп накаливания, люминесцентных ламп и у компактных люминесцентных ламп.

По данным таблицы 4.2 видно, что наибольший уровень фликера наблюдался у люминесцентных ламп.

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

Амплитуда относительных изменений напряжения, соответствующая точке минимума НЧХП люминесцентных ламп мощностью 40 Вт составляет  $d_{min}=0,099\%$  (см. таблицу 2.14).

5. Выполнено измерение  $d_{max}$ , величина которой составила 2,886 %.

6. Расчет  $\Delta d$ .

Результаты расчета  $\Delta d$  для ламп различных типов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – 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	–

По данным таблицы 4.3 видно, что в случае использования светодиодных ламп проведение мероприятий по нормализации фликера не требуется.

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

Анализ способов нормализации фликера позволил определить два варианта снижения уровня восприятия фликера:

- раздельное питание потребителей электрической энергии с резкопеременным и постоянным режимами работы;
- применение устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ).

Первый вариант является дорогостоящим и требует изменения конфигурации схемы по стороне высокого напряжения, что нецелесообразно по экономическим соображениям.

При реализации второго варианта требуется подключение УКРМ к сборным шинам СШ-1 и СШ-2 распределительного устройства 0,4 кВ трансформаторной подстанции, питающей административный корпус ООО «Промышленная металлургия».

Мощность УКРМ может быть определена по выражению [101]:

$$Q_k = \frac{\Delta d_{max} \cdot U_{ном}^2}{100 \cdot X_m}, \quad (4.5)$$

где  $\Delta d_{max}$  – компенсируемый уровень колебаний напряжения, %;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение, В;  $X_m$  – реактивное сопротивление трансформатора, Ом.

В соответствии с [94] величину реактивного сопротивления трансформатора определяют по выражению

$$X_m = \frac{U_{кз}}{100} \cdot \frac{U_{номтр}^2}{S_{номтр}}, \quad (4.6)$$

где  $U_{кз}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;  $S_{номтр}$  – номинальная мощность трансформатора, ВА;  $U_{номтр}$  – номинальное напряжение трансформатора, В.

Административный корпус ООО «Промышленная металлургия» получает питание от трансформаторов типа ТМ-1000/10. Величина их реактивного сопротивления определена согласно выражениям (4.6):

$$X_m = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{400^2}{1000000} = 0,0088 \text{ Ом.}$$

Расчетная мощность УКРМ при использовании ламп накаливания мощностью 60 Вт, определена по выражению (4.5):

$$Q_k = \frac{(2,886 - 0,196) \cdot 400^2}{100 \cdot 0,0088} = 489,09 \text{ кВар.}$$

Значения мощности УКРМ, необходимых для снижения колебаний напряжения в электрической сети при использовании ламп различных типов приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Мощность УКРМ, необходимых для снижения колебаний напряжения в электрической сети при использовании ламп различных типов

Тип и мощность ламп	$Q_k$ , 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.

8. Измерение  $d_{max}$ .

После установки УКРМ  $d_{max}$  составила 0,09 %.

9. Проверка эффективности проведенных мероприятий.

Уровень колебаний напряжения в электрической сети после установки УКРМ находится в зоне нечувствительности к колебаниям светового потока ламп. Это подтверждается тем, что после проведения мероприятий выполняется условие:

$$d_{max} < d_{min} \quad (4.7)$$

Кратковременная доза фликера у люминесцентных ламп после проведения мероприятий по нормализации фликера составила 0,98 о.е., что не превышает допустимые действующими нормами [8] значения 1 о.е.

Данное положение подтверждает эффективность методики по нормализации фликера на основе данных расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

#### **4.2.2. Методика по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети**

Методика по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети предполагает процедуры, выполняемые в следующем порядке:

1. Анализ состава применяемых ламп.
2. Расчет НЧХП применяемых ламп.
3. Оценка фликера.
4. Запись огибающей среднеквадратичных изменений напряжения в электрической сети,  $U(t)$ .

Огибающая среднеквадратичных изменений напряжения электрической сети может быть записана с помощью цифрового осциллографа с соответствующей функциональной возможностью.

5. Спектральный анализ огибающей среднеквадратичных изменений напряжения.

Спектральный анализ огибающей среднеквадратичных изменений напряжения может быть выполнен с помощью быстрого преобразования Фурье. Его результатом должны быть значения амплитуды изменений напряжения,  $U_i$  и соответствующих им частот повторения изменений,  $f_{кни}$

$$U_i(f_{кни}) = U_1(f_{кн1}); U_2(f_{кн2}); \dots U_n(f_{кнn}). \quad (4.8)$$



На рисунке 4.7 представлен алгоритм методики нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

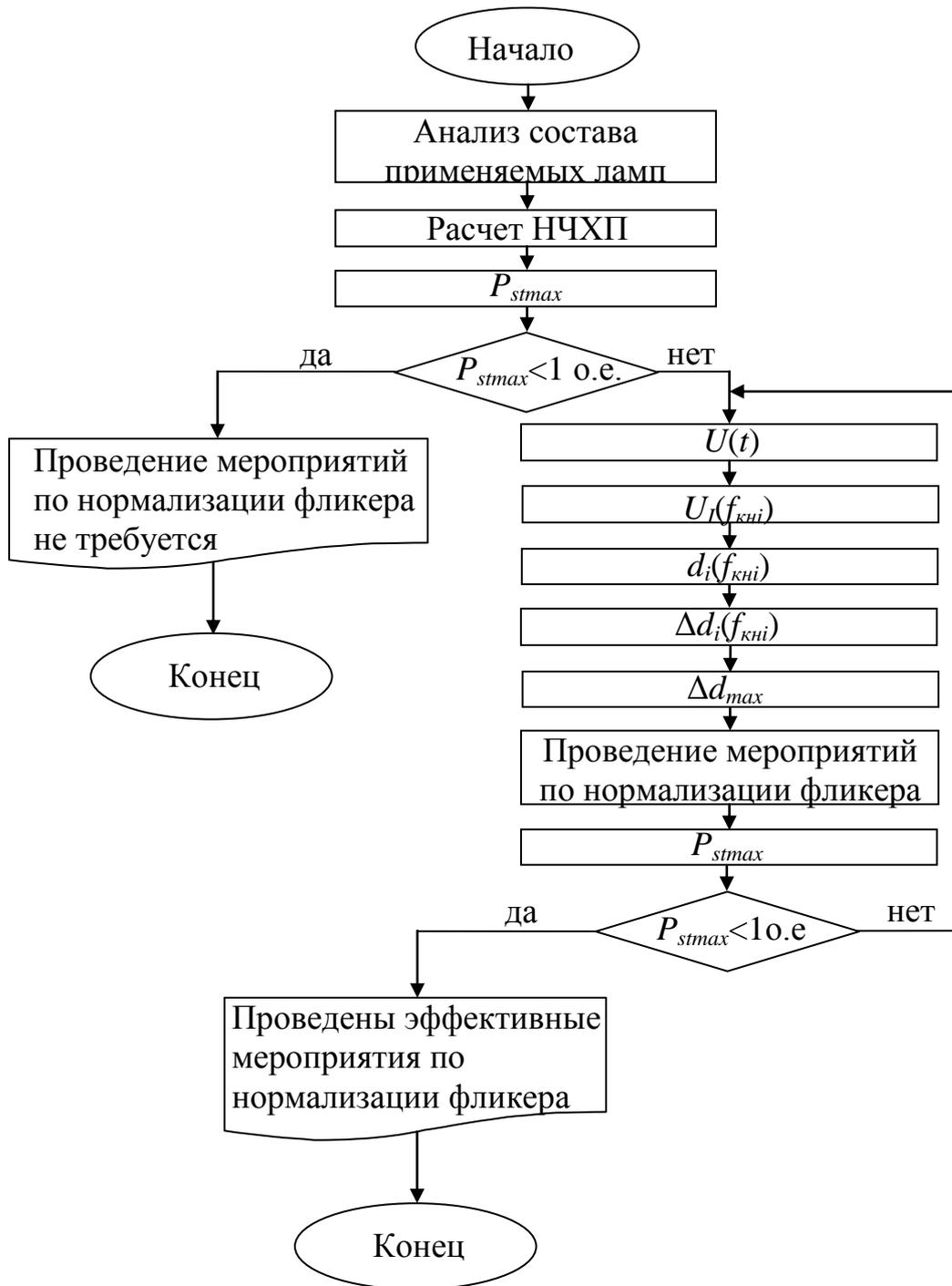


Рисунок 4.7 – Алгоритм методики по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети

Для иллюстрации применения методики по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети на рисунке 4.8 представлен фрагмент электрической сети студенческого городка БрГУ, который получает питание от двухтрансформаторной подстанции с установленными на ней силовыми трансформаторами типа ТМ-630/10.

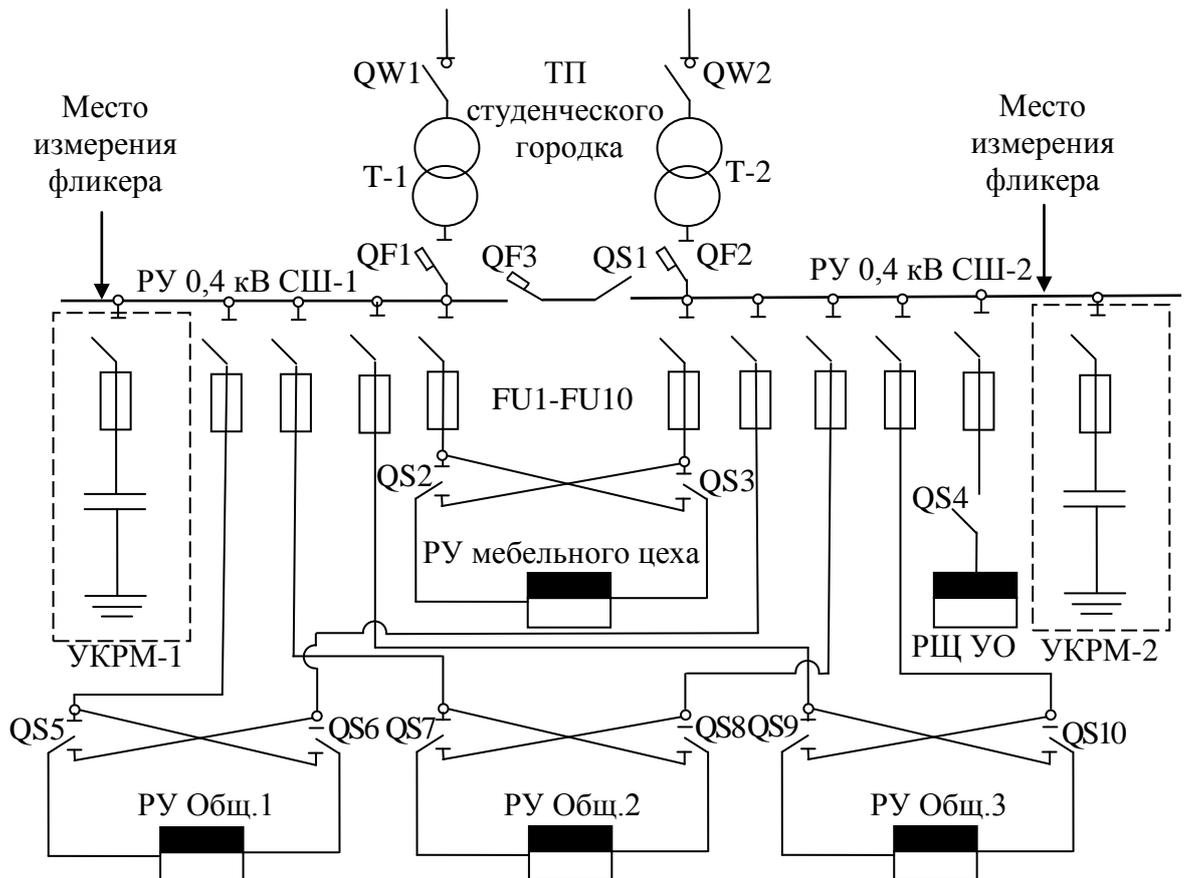


Рисунок 4.8 – Фрагмент электрической сети студенческого городка БрГУ

В общежитиях университета, кроме жилых, располагаются офисные и учебные помещения. Поэтому в соответствии с действующими нормами [8], величина кратковременной дозы фликера в них не должна превышать 1 о.е.

Основными источниками искажений качества электрической энергии в схеме электроснабжения студенческого городка, являются станки мебельного цеха с числовым программным управлением ООО «Лесные инновации» и электрическая нагрузка общежитий.

В соответствии с методикой по нормализации фликера на основе данных инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети последовательно выполнены следующие процедуры:

1. Анализ состава применяемых ламп.

Освещение бытовых и общественных помещений в электрической сети, представленной на рисунке 4.8, осуществляется люминесцентными лампами мощностью 40 Вт, лампами накаливания мощностью 60 Вт и компактными люминесцентными лампами мощностью 15 Вт.

Для оценки эффективности результатов реализации методики состав источников света включены все группы ламп, исследованные в главе 2 данной диссертационной работы.

2. Расчет НЧХП ламп различных типов выполнен во второй главе данной диссертационной работы.

3. Оценка фликера.

Суточные измерения  $P_{st}$  были выполнены с помощью анализатора качества электрической энергии «Энергомонитор 3.3Т».

Фрагмент графика изменений значений  $P_{st}$  в электрической сети студенческого городка БрГУ представлен на рисунке 4.9.

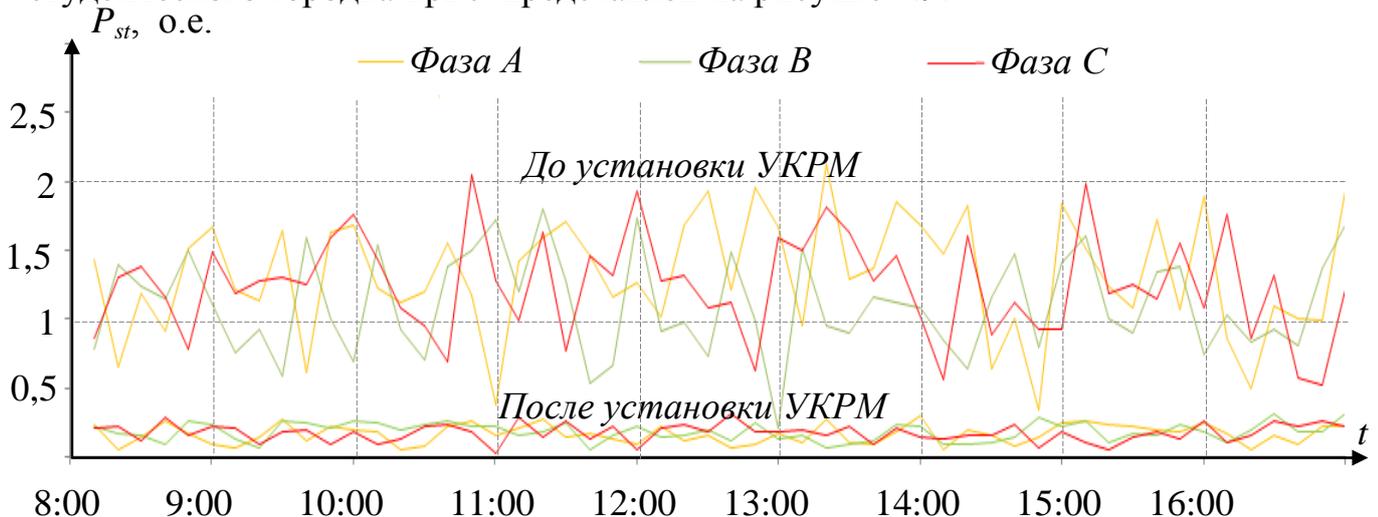


Рисунок 4.9 – Фрагмент графика изменений значений  $P_{st}$  в электрической сети студенческого городка БрГУ

В таблице 4.5 представлены результаты определения наибольших уровней фликера у ламп различных типов.

Таблица 4.5 – Результаты определения наибольших уровней фликера у ламп различных типов

Тип и мощность ламп	Поправочный коэффициент $p^l$ , 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 таблицы 4.5 видно превышение нормируемого действующим стандартом [8] уровня фликера у ламп накаливания, люминесцентных ламп и у компактных люминесцентных ламп. Наибольшее значение  $P_{st}$  наблюдалось у люминесцентных ламп. Оно составило 4,4 о.е. В этой связи пункты методики 7 и 8 должны были выполняться для этой группы ламп. Однако для оценки эффективности результатов использования методики, мероприятия, соответствующие пунктам 7 и 8, выполнялись и для других выделенных групп источников света.

4. Запись огибающей среднеквадратичных изменений напряжения,  $U(t)$ .

Огибающая среднеквадратичных изменений напряжения электрической сети была записана с помощью цифрового осциллографа «OWON PS55022S». Её графическая интерпретация представлена на рисунке 4.10.

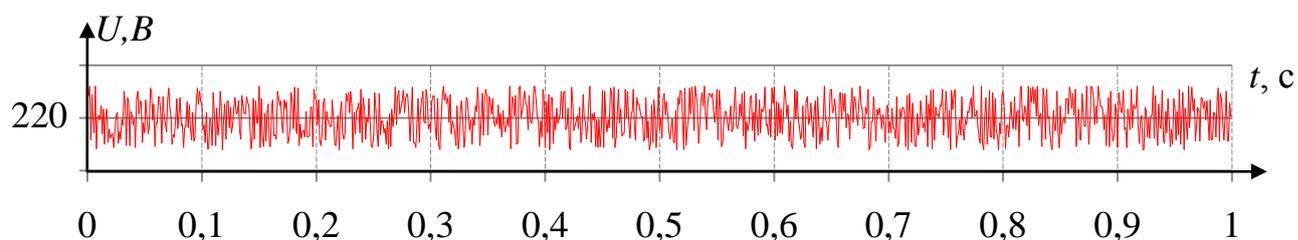


Рисунок 4.10 – Графическая интерпретация огибающей среднеквадратичных изменений напряжения в электрической сети

### 5. Спектральный анализ колебаний напряжения в электрической сети.

Спектральный анализ огибающей среднеквадратичных изменений напряжения выполнен с помощью быстрого преобразования Фурье в программной среде MatLab.

6. Расчет значений амплитуды относительных изменений напряжения осуществлен по выражению (4.9).

7. Определение отклонений амплитуды относительных изменений напряжения от НЧХП применяемых ламп выполнено по уравнениям (4.10).

### 8. Выбор $\Delta d_{max}$ .

Наибольшее отклонение амплитуды относительных изменений напряжения от НЧХП для ламп различных типов соответствовало частоте колебаний напряжения в электрической сети 5 Гц.

Реализация пунктов методики 6÷8 выполнялась в программной среде MatLab.

Графическое изображение результатов реализации пунктов методики 6÷8 для люминесцентных ламп мощностью 40 Вт представлено на рисунке 4.11.

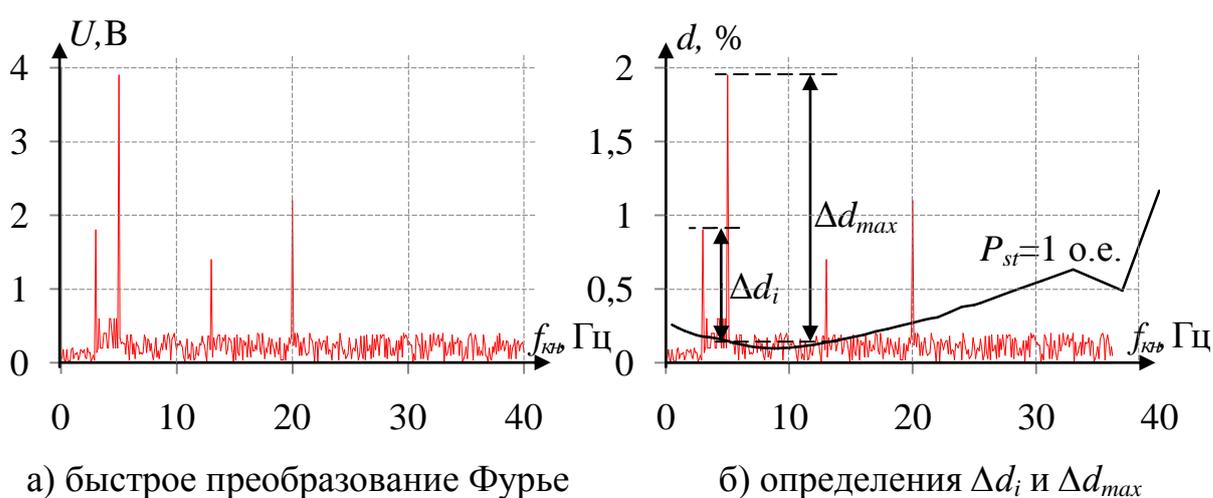


Рисунок 4.11 – Графическое изображение результатов реализации пунктов методики 6÷8 для люминесцентных ламп мощностью 40 Вт

Графическое изображение результатов спектрального анализа и точки минимальной амплитуды относительных изменений напряжения, соответствующие порогу восприятия колебаний светового потока ламп различных типов, представлены на рисунке 4.12.

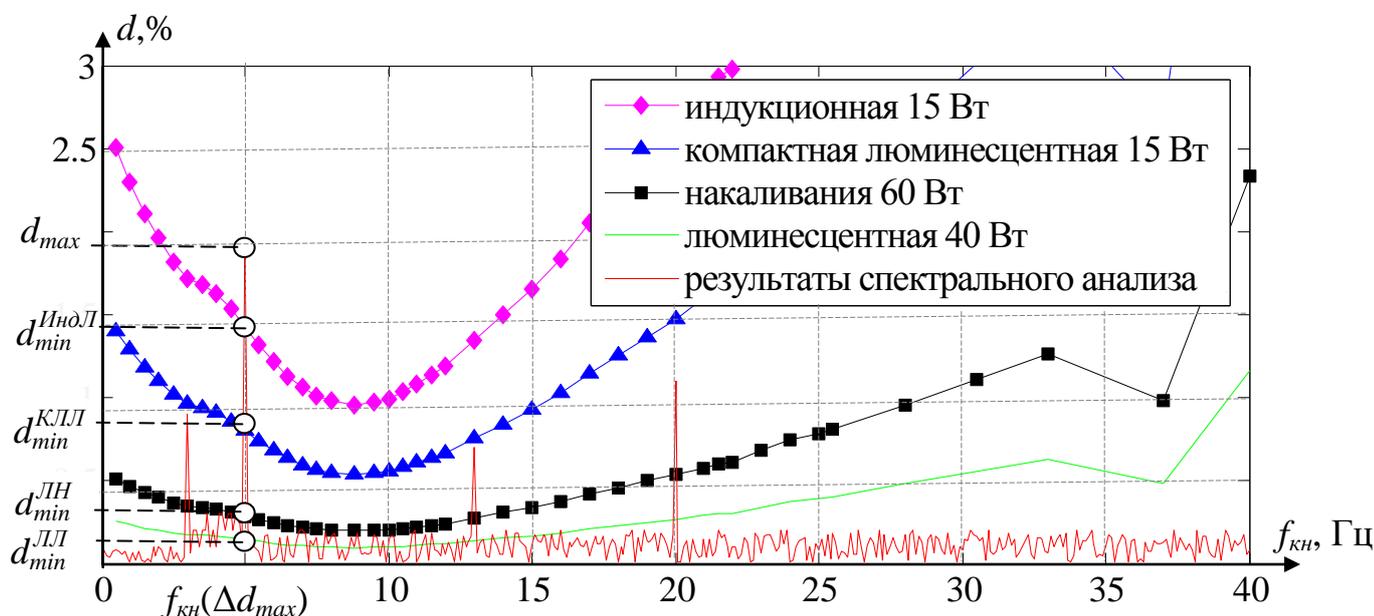


Рисунок 4.12 – Графическое изображение определения требуемой величины снижения колебаний напряжения в электрической сети

#### 9. Проведение мероприятий по нормализации фликера.

На трансформаторной подстанции студенческого городка установлены трансформаторы типа ТМ–630/10. Величина их реактивного сопротивления определена по выражению (4.6):

$$X_m = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{400^2}{6300000} = 0,0139 \text{ Ом.}$$

Необходимый компенсируемый уровень снижения колебаний напряжения в электрической сети и значения мощности УКРМ при использовании ламп различных типов определены по результатам расчетной и инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети. Их значения приведены в таблице 4.6 и таблице 4.7, соответственно.

Таблица 4.6 – Значения мощности УКРМ, определенные по результатам расчетной оценки колебаний напряжения в электрической сети

Тип и мощность ламп	$d_{max}-d_{min}$ , %	$Q_{к2}$ , кВар
Накаливания 60 Вт	1,9-0,199	200
Люминесцентная 40 Вт	1,9-0,099	225
Компактная люминесцентная 40 Вт	1,9-0,538	160
Индукционная 15 Вт	1,9-0,95	110
Светодиодная 11 Вт	-	-

Таблица 4.7 – Значения мощности УКРМ, определенные по результатам инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети

Тип и мощность ламп	$d_{max}-d_{min}$ , %	$Q_{к2}$ , кВар
Накаливания 60 Вт	1,9-0,29	190
Люминесцентная 40 Вт	1,9-0,147	200
Компактная люминесцентная 40 Вт	1,9-0,8	130
Индукционная 15 Вт	1,9-1,42	55
Светодиодная 11 Вт	-	-

По данным таблиц 4.6 и 4.7 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 в электрической сети светодиодных ламп, практически нечувствительных к колебаниям напряжения, установка УКРМ не требовалась.

Наибольшая чувствительность к колебаниям напряжения выявлена у люминесцентных ламп. Поэтому, в соответствии с таблицей 4.7, к установке были приняты УКРМ мощностью 200 кВар типа УКРМ-Т- 0,4-200.

#### 10. Оценка фликера.

После установки УКРМ величина  $d_{max}$  составила 0,12%. Наибольшее значение  $P_{st}$ , зарегистрированное у люминесцентных ламп мощностью 40 Вт, составило 0,86 о.е, что удовлетворяет нормам [8].

Результаты оценки фликера после проведения мероприятий подтверждают эффективность методики нормализации фликера на основе инструментальной оценки колебаний напряжения в электрической сети.

#### 4.6. Выводы к главе 4

1. 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.

2. 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 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 и созданного 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 суммой простых полиномов методом последовательных приближений.

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

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 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.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]: ГОСТ 13109–97. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.
2. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems [Text]: IEEE Std 519–1992. – New York.: Published by the IEEE, 1993.
3. Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования [Текст]: ГОСТ 51317.4.15–2012. (МЭК 61000.4.15:2010).– М.: Стандартинформ, 2014.
4. Ives, H., Allowable amplitudes and frequencies of voltage fluctuation in incandescent lamp Works [Text] / H. Ives // Transactions of Illumination Engineering Society.–1909.–709 p.
5. Langmuir, I., The flicker of incandescent lamps on alternating current circuits and stroboscopic effects [Text]/ I. Langmuir// GE Review.– 1914.– vol.17, no.3.–P.294–300.
6. Distribution data book [Text]: GET–1008L.– New York.: General electric co. – 1930.– 60 p.
7. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants [Text]: IEEE Std 141–1969. – New York: Published by the IEEE, 1969.
8. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний [Текст]: ГОСТ 30804.3.3–2013.–М.: Стандартинформ, 2014.
9. Dzn. Lange, H. de. Experiments on flicker and some calculations on an electric analogue of the foveal system [Text]/ H. De Lange// Physica, 1952, vol. 18.– P. 935–950.

10. Dzn. Lange, H. de. Attenuation characteristics and phase-shift characteristics of the human fovea-cortex systems in relation to flicker fusion phenomena [Text]/ H. De Lange// PhD thesis. – 1957.
11. Rashbass, C. The visibility of transient changes of luminance/ C. Rashbass// The Journal of Physiology.– 1970. – no. 210. – P.165–186.
12. Mirra, C. Il fenomeno del flicker. Analizi delle sue caratteristiche. Technishe di misura e matodi dilimitazone [Text]/ C. Mirra, G. Sanni// L' Elletrotechnica.– 1987. . – P.805–822.
13. Flickermeter. Functional and design specifications [Text]: IEC–868.– 1986.
14. Electromagnetic computability (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques– Section 15. Flickermeter. Functional and design specifications [Text]: IEC 61000–4–15. –1997.
15. IEEE Recommended Practice for measurement and limits of voltage fluctuations and associated light flicker on AC Power systems [Text]: IEEE Std 1453–2004. – New York: Published by the IEEE, 2004.
16. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии у её приёмников, присоединенных электрическим сетям общего назначения [Текст]: ГОСТ 13109–67.– М.: Госстандарт СССР.– 1967.
17. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в сетях общего назначения [Текст]: ГОСТ 13109–67.– М.: Госстандарт СССР.– 1987.
18. Жежеленко, И.В. Качество электроэнергии на промышленном предприятии [Текст]: монография/ И.В. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко.– Киев: Техніка, 1981.–160 с.
19. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [Текст]: монография/ И.В. Жежеленко.– М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
20. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]: ГОСТ 32144–2013.– М.: Стандартинформ, 2014.

21. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение колебаний напряжения и фликера, вызываемых техническими средствами с номинальным током более 75 А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний [Текст]: ГОСТ IEC/TS 61000-3-5-2014.– М.: Стандартинформ, 2014.

22. Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения при определенных условиях. Нормы и методы испытаний. [Текст]: ГОСТ 30804.3.11-2013 – М.: Стандартинформ, 2013.

23. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems [Text]: IEC 61000-2-2. –2002.

24. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-7: Limits – Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems [Text]: IEC 61000-3-7. –2008.

25. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-3: Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A and subject to conditional connection [Text]: IEC 61000-3-3. –2013.

26. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-11: Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems – Equipment with rated current  $\leq 75$  A and subject to conditional connection [Text]: IEC 61000-3-11. –2000.

27. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-5: Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems for equipment with rated current greater 75 A [Text]: IEC 61000-3-5. –2009.

28. IEEE Recommended Practice – Adoption of IEC 61000-4-15:2010, Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications [Text]: IEEE Std 1453-2011.

29. Курбацкий, В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электрических сетях [Текст]: учебное пособие 2-е изд., перераб. и доп. / В.Г. Курбацкий.– Братск: ГОУ ВПО БрГУ, 2006.– 327 с.
30. Курбацкий, В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях [Текст]: монография / В.Г. Курбацкий. Братск: БрГТУ, 1999.–220 с.
31. Вагин, Г.Я. Расчет ущербов от колебаний напряжения [Текст]/ Г.Я. Вагин // В кн.: Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических сетях.– М.: МДНТП, 1982.– С.51–56.
32. Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения [Текст]: Учебное пособие / И.И. Карташев; ред.М.А. Калугина.– М.: Изд-во МЭИ, 2001.– 120 с.
33. Куско, А. Качество электроэнергии в электрических сетях [Текст]: монография/ А. Куско, М. Томсон.– М.: Додэка–XXI, 2008.– 336 с.
34. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст]: монография/ В.С. Иванов, В.И. Соколов.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 337 с.
35. Куро, Жак. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении [Электронный ресурс]/ Жак Куро// РУСЭЛТ, 2007.– Режим доступа к ст.: [http://www.ruselt-spb.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=986](http://www.ruselt-spb.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=986).
36. Шидловский, А.К. Повышение качества в электрических сетях [Текст]: монография / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.
37. Шидловский, А.К. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий [Текст]: учебн. для вузов / А.К. Шидловский, Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный, И.Г. Крахмалин. – Киев: Наукова думка, 1992. – 236 с.

38. Шидловский, А.К. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок [Текст]: монография / А.К. Шидловский, Б.П. Борисов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 167 с.
39. Федченко, В.Г. Качество электроэнергии в электрических сетях и способы его обеспечения [Текст]: учебное пособие / В.Г. Федченко. – М.: МЭИ, 1992. – 102 с.
40. Салтыков, В. М. Колебания напряжения в сетях параллельных дуговых сталеплавильных печей [Текст]: В. М.Салтыков, О. А.Салтыкова// Электричество, 1981, №2. – С.53–56.
41. Блок, В.М. Электрические системы и сети [Текст]: учебное пособие / В.М. Блок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 430 с.
42. Лисицкий, К.Е. Анализ проблемы колебаний напряжения в электрических сетях/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк [Текст]// Матер. Регион. науч.-техн. конф. «Энергетике региона».– Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010.– 265 с.
43. Сендерович, Г.А. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения [Текст]/ Г.А. Сендерович, А.В. Дьяченко // Электротехника и Электромеханика.– 2016.–№2.– С.54–60.
44. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения [Текст]: ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990).– М.: Стандартиформ, 2013.
45. Естественное и искусственное освещение [Текст]: СНиП 23-05-95/ Минстрой России. М.: ГП «Информрекламиздат», 1995.- 35 с.
46. Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещенности [Текст]: ГОСТ 54945-2012. М.: Стандартиформ, 2012.
47. Оценка освещения рабочих мест [Текст]: Методические указания МУ 2.2.4.706–98ОМ/МУ от РМ 01–98 (утв. Минтрудом РФ, Минздравом РФ, Главным государственным санитарным врачом РФ 16.06.98).

48. Лисицкий, К.Е. Разработка метода оценки погрешности нормативных способов измерения фликера при использовании альтернативных источников света [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмеляк// Системы. Методы. Технологии.– 2010.– №7.– С.91–94.

49. Качество электрической энергии. Термины и определения [Текст]: ГОСТ 23875–88. М.: Стандартиформ, 2008.

50. Лисицкий, К.Е. Определение параметров снижения колебаний напряжения в электрической сети для борьбы с фликером [Текст]/ 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. – 591 с.

51. Жежеленко, И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях [Текст]: монография/ И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261с.

52. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [Текст]: монография/ И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко.– М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

53. Блоков, А.И. Численный метод расчета фликера напряжения [Текст] / А.И. Блоков, Г.П. Корнилов, Т.Р. Хамшин, А.Ю. Коваленко // Наука и производство Урала.– 2005.– №1.– С.145–150.

54. Новоселов, Н.А. Анализ показателей качества электроэнергии при проектировании систем электроснабжения дуговых сталеплавильных печей малой мощности [Текст]: монография / Н.А. Новоселов, А.А. Николаев, Г.П. Корнилов.– Магнитогорск.: Издательство: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2014.– 96 с.

55. Новосёлов, Н.А. Методика расчета кратковременной дозы фликера в сетях с дуговыми сталеплавильными печами [Текст]/ Н.А. Новосёлов, А.А. Николаев, Г.П. Корнилов // Промышленная энергетика. – 2014. - №1. – С.27–31.

56. Новоселов, Н.А. Совершенствование методик расчета показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения с дуговыми сталеплавильными печами малой мощности [Текст]: автореферат дисс. канд. тех. наук / Н.А. Новоселов. – Магнитогорск, 2012.– 22 с.
57. Дмитриева Е.Н. Погрешности расчета доз фликера напряжения и проверка функционирования фликерметра [Текст]/ Е.Н. Дмитриева, Э.Г. Куренный, В.А. Топчий // Электричество.– 2013. – №2.– С.28–33.
58. Топчий, О.А. Расчет доз фликера напряжения при периодических колебаниях нагрузки [Электронный ресурс]: – автореферат дисс. маг. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2009/eltf/topchy/diss/index.htm>.
59. Дмитриева Е.Н. Совершенствование цифровой фликер-модели для оценки колебаний напряжения [Текст]/ Е.Н. Дмитриева, В.А. Топчий // Электричество.– 2010. – №7. – С.20–25.
60. Куренный, Э.Г. Совершенствование модели фликера [Текст]/ Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриева, Д. Куренный, Н.В. Цыганкова// Электричество.– 2003. – №2. – С.17–23.
61. Куренный Э.Г. Метод парциальных реакций для анализа процессов на выходе линейных фильтров в моделях электромагнитной совместимости [Текст]/ Э.Г. Куренный, А.П. Лютый, Л.В. Черникова // Электричество.– 2006. – №10. – С.11–18.
62. Куренный, В.Г. Оценка влияния колебаний напряжения на электромагнитную совместимость при периодических изменениях напряжения [Текст]/ В.Г. Куренный, В.Н. Мельник// Праці Донецького державного технічного університету "Електротехніка і енергетика".– 2000. – № 17. – С.142–145.
63. Куренный, Э.Г. Оценка качества электроэнергии с использованием моделей объектов [Текст] / Э.Г. Куренный, В.М. Ковальчук, А.Д. Коломытцев // Материалы конференции "Качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий". М.: МДНТП, 1977. – С. 23–29.

64. Андрушкевич, О.Н. Электромагнитная совместимость. Совершенствование фликер-модели [Электронный ресурс]: – автореферат дисс. маг. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2007/eltf/andrushkevich/diss/index.htm>.
65. Юшкова, Е.И. Оценивание ЭМС по отклонениям и колебаниям напряжения в электрических сетях с дуговым сталеплавильными печами [Электронный ресурс]: – автореферат дисс. маг. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2011/etf/yushkova/diss/index.htm>.
66. Мельник, В.Н. Оценка влияния колебаний напряжения на электромагнитную совместимость при периодических изменениях напряжения [Электронный ресурс]: – автореферат дисс. маг. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2007/eltf/andrushkevich/library/kolebanie.htm>.
67. Emanuel, A.E. A simple lamp – eye – brain model for flicker observations [Text]/ A.E. Emanuel, L. Perreto // IEEE Transactions on Power Delivery, Jul.2004, vol.19, №3. – P. 1308–1313.
68. Quintero, J.A. Develop of a flicker meter based on a digital signal processor [Text] / J.A. Quintero, H. Maya, A. Aguilar // Universities Power Engineering Conference UPEC 39th International, 2009, vol.1. – P. 907–911.
69. Leonard, W.White. A discrete Matlab – Simulink flickermeter model for power quality studies [Text]/ W.White Leonard, Bhattacharaya Subhashish// IEEE transactions on instrumentation and measurement, March 2010, vol.59, №3. – P.527–533.
70. Fallen, C. M. Development and Testing of a Real–Time digital voltage flickermeter [Text]/ C.M. Fallen, B.A. VcDermott// Transmission and Distribution Conference, 1996 IEEE, 1996. – P. 31–36.
71. Caldara, S. Digital techniques for flicker measurement: Algorithms and implementations analysis [Text]/ S. Caldara, S. Nccio, C. Spataro// In Proc. IEEE Instrumentation and Measurement conf., 1999. – P. 656–661.
72. Caldara, S. A virtual instrument for measurement of flicker [Text]/ S. Caldara, S. Nuccio, C. Spataro// IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Oct.1998, vol.47, №45. – P. 1155–1158.

73. Bertola, A. A Matlab Simulink flickermeter model for power quality studies [Text] / A. Bertola, G.C. Lazaroiu, M. Roscia, D. Zaninelli // in Proc. 11th Int. Conf. Harmonics Quality Power, 2004. – P.734–738.
74. Лисицкий, К.Е. Моделирование цифрового фликерметра для оценки дозы фликера в электрических сетях общего назначения [Текст]/ К.Е. Лисицкий // Труды Братского Государственного Университета: сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2т. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – Т.2.– 332 с.
75. Лисицкий, К.Е. Моделирование цифрового комплекса для оценки дозы фликера в электрических сетях общего назначения [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмемяк // Матер.VIII (XXX) Всерос. науч.-техн. конф. (19-23 апреля 2010 г.). – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010.– 178 с.
76. Wang, C. Incandescent lamp flicker mitigation and measurement [Text]/ C. Wang, M.J. Devaney // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Aug.2004, vol. 53, №4. – P.1028–1034.
77. Gomez, J.C. Flicker Measurement and Light Effect [Text]/ J.C. Gomez, M.M. Morcos // IEEE Power Engineering Review, Nov. 2002, vol. 22, №11. – P.11–15.
78. Rong, C. Flickermeter used for different types of lamp [Text]/ C. Rong, J.F.C. Cobben, J.M.A. Myrzik, J.H. Blom, W.L. Kling // 9th International Conference of electrical power quality and Utilization (EPQU'2007), Barcelona, Spain, 9–11 October 2007. – P. 1–6.
79. UIE Working Group on Disturbances. Flicker measurement and evaluation [Text]/ UIE Working Group on Disturbances.– Paris, 1992.– P.41–52.
80. Лисицкий, К.Е. Разработка аппаратного обеспечения для определения передаточных функций альтернативных источников света при оценке дозы фликера [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмемяк // Системы. Методы. Технологии.– 2012. –№7. – С.98–101.
81. Лисицкий, К.Е. Адаптация цифровых фликерметров к оценке дозы фликера альтернативных источников света [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмемяк // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – №3(19). – С.121–124.

82. Лисицкий, К.Е. Усовершенствование стандартной модели фликерметра для оценки дозы фликера в сетях общего назначения [Текст] / К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяк // Технологии ЭМС.– 2014. – №1(48). – С.11–16.

83. Лисицкий, К.Е. Аппаратное решение проблемы оценки дозы фликера источников света [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяк // Матер.Х (XXXII) Всерос. науч.- техн. конф. (18-22 апреля 2011 г.).– Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2011.– 149 с.

84. Лисицкий, К.Е. Аппаратное решение проблемы определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяк// Труды Братского Государственного Университета: сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2т.– Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2011.– Т.2. – 252 с.

85. Лисицкий, К.Е. Аппаратное решение задачи адаптации современных цифровых фликерметров [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяк // Труды Всерос. науч.- практ. конф.: Братская ГЭС: история строительства, опыт эксплуатации, перспективы.– Братск: Братск. Госуд. ун-т., 2011.– 248 с.

86. Лисицкий, К.Е. Усовершенствованная модель фликерметра [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмяк// Энергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012.– 588 с.

87. Лисицкий, К.Е. Метод оценки дозы фликера, учитывающий тип источника света [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В.Струмяк // Труды БРГУ, Серия: Естественные и инженерные науки.– Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2014.– Т1.– С.63–68.

88. Лисицкий, К.Е. Совершенствование метода оценки фликера [Текст]/ К.Е. Лисицкий // Системные исследования в энергетике/ Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып.44. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014.– С.50–55.

89. Лисицкий, К.Е. Усовершенствованный метод оценки фликера в электрической сети [Текст]/ 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.

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

91. Лисицкий, К.Е. Разработка программируемого источника питания 220 В [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмемяк // Труды Всерос. науч.- практ. конф.: Братская ГЭС: история строительства, опыт эксплуатации, перспективы.– Братск: Братск. Госуд. ун-т., 2011.– 248 с.

92. Лисицкий, К.Е. Выбор средств уменьшения кратковременной дозы фликера при использовании энергосберегающих ламп [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмемяк А.В., М.А. Балаев// Системы. Методы. Технологии. – 2015. – №1(25). – С.113–116.

93. Лисицкий, К.Е. Выбор мероприятия для снижения фликера и оценка их эффективности [Текст]/ К.Е. Лисицкий, А.В. Струмемяк, 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.– 380 с.

94. Анчарова, Т.В. Качество электрической энергии и её сертификация [Текст]: учебное пособие / Т.В. Анчарова, Л.М. Рыбаков.– Йошкар-Ола, 2000. – 108 с.

95. Ермилов, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст]: учеб. для электромонтеров, занимающихся монтажом и эксплуатацией электрооборудования промышленных предприятий/ А.А. Ермилов // 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

96. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст]: учебн. для вузов / А.А. Федоров, В.В. Каменева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 382 с.

97. Князевский, В.А. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст]: учебн. / В.А. Князевский, В.Ю. Лишкин. – М.: Высшая школа, 1988. – 410 с.

98. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст]: учебн. / Б.И. Кудрин // 2-е изд. Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по курсу "Электроснабжение промышленных предприятий". – М.: Интернет инженерия, 2006. – 672 с.
99. Axelberg, P. On Tracing Flicker Sources and Classification of Voltage Disturbances [Text] / P. Axelberg // Department of Signals and Systems Signal Processing Group CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Goteborg, Sweden, 2007. – 188 p.
100. Рай, А. В. Эффективность сдвоенных реакторов в условиях электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]: – автореферат дисс. маг.– Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2008/eltf/ray/diss/index.htm>
101. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях [Текст]: монография / В.А. Веников, Л.А. Жуков, И.И. Карташев, Ю.П. Рыжов. – Ленинград: Энергия, 1975. -136 с.
102. Сравнительный анализ подавления фликера статическим тиристорным компенсатором и активным фильтрокомпенсирующим устройством/А.М. Матинян, А.Н. Киселев, А.В. Дроздов // Электричество. – 2014. – №12.– С. 4–12.
103. Технические таблицы [Электронный ресурс]: – Электрон ст. – Режим доступа к ст.: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/LightAndColor/LightFlowEfficiency>.
104. Компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) 220 Вольт. Технические характеристики [Электронный ресурс]: – Электрон ст. – Режим доступа к ст.: <http://www.oooaladin.ru/tech.php>.
105. Индукционные лампы: мифы и реальность [Электронный ресурс]: – Электрон ст. – Режим доступа к ст.: [http://led-displays.ru/indukcionnye\\_lampy.html](http://led-displays.ru/indukcionnye_lampy.html).
106. Реестр инновационных продуктов, технологий и услуг, рекомендованных к использованию в Российской Федерации [Электронный ресурс]: – Электрон ст. – Режим доступа к ст.: <http://innoprod.startbase.ru/products/23496>.
107. TDA7293 [Электронный ресурс]: Datasheet / ST Microelectronics Group of companies. 1999. – 13 p. – Электрон ст. – Режим доступа к ст.: [www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXrqwxu.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXrqwxu.pdf).

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Разработка аппаратной части аппаратно-программного комплекса

Для реализации методики расчета НЧХП создан аппаратно-программный комплекс, позволяющий определять влияние типа применяемых ламп на уровень фликера.

Аппаратно-программный комплекс имеет следующие технические характеристики:

- способ управления ..... аналоговый;
- напряжение питания ..... ~220÷230 В;
- напряжение дифференциального входа ..... ±2,5 В;
- мощность ..... 140 Вт;
- напряжение на выходе ..... ~220÷230 В.

На рисунке П.1.1 представлена принципиальная электрическая схема аппаратно-программного комплекса.

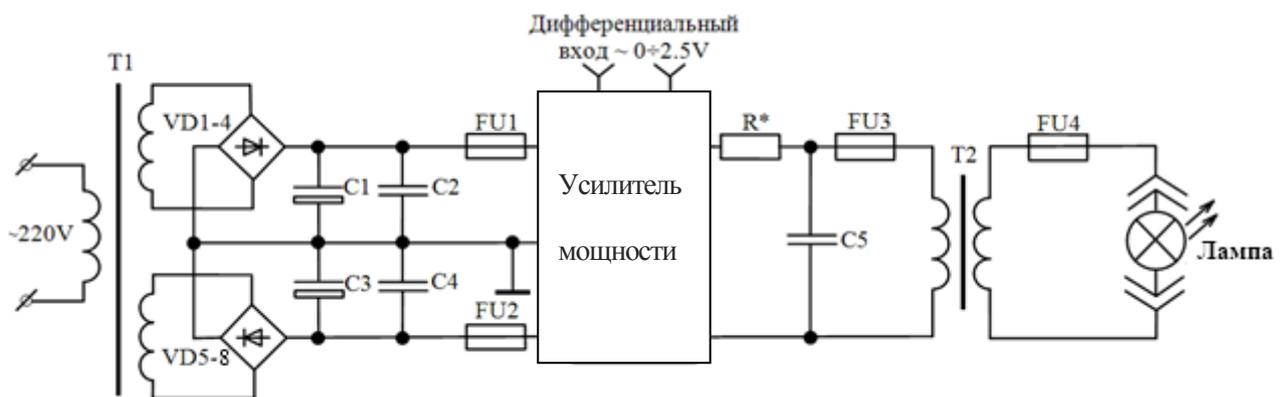


Рисунок П.1.1 –Принципиальная электрическая схема аппаратно-программного комплекса

Из рисунка П.1.1 видно, что схема аппаратно-программного комплекса получает питание от сети через понижающий трансформатор Т1. Выпрямители VD1÷4, VD5÷6 обеспечивают двуполярное питание ±40В. Конденсаторы С1÷С4

предназначены для сглаживания пульсаций. Предохранители FU1, FU2 обеспечивают защиту блоков выпрямителей от коротких замыканий в усилителе.

Аналоговый сигнал с канала ЦАП платы ввода-вывода PCI L-783M поступает на дифференциальный вход усилителя мощности, который выполняет функцию повторителя сигнала. На выходе усилителя мощности присутствует напряжение с амплитудой  $\pm 40\text{В}$ , которое подается на первичную обмотку повышающего трансформатора T2 через предохранитель FU3. Конденсатор C5 предназначен для компенсации реактивной мощности, потребляемой трансформатором T2, что позволяет частично уменьшить нагрузку усилителя мощности. Резистор R\* предназначен для согласования активного сопротивления трансформатора T2 со входом усилителя мощности. С вторичной обмотки трансформатора T2 питание поступает на исследуемую лампу. Для защиты усилителя мощности от коротких замыканий в нагрузке используются предохранители FU3, FU4. Непосредственно блок усилителя мощности реализован на интегральной микросхеме TDA7293 со встроенной быстродействующей защитой от перегрузки. При этом его пиковая мощность нагрузки составляет 140 Вт.

Интегральная микросхема TDA7293 представляет собой усилитель мощности класса АВ. Одной из основных особенностей этой микросхемы является применение полевых транзисторов в предварительных и выходных каскадах усиления.

На рисунке П.1.2 представлена принципиальная электрическая схема усилителя мощности.

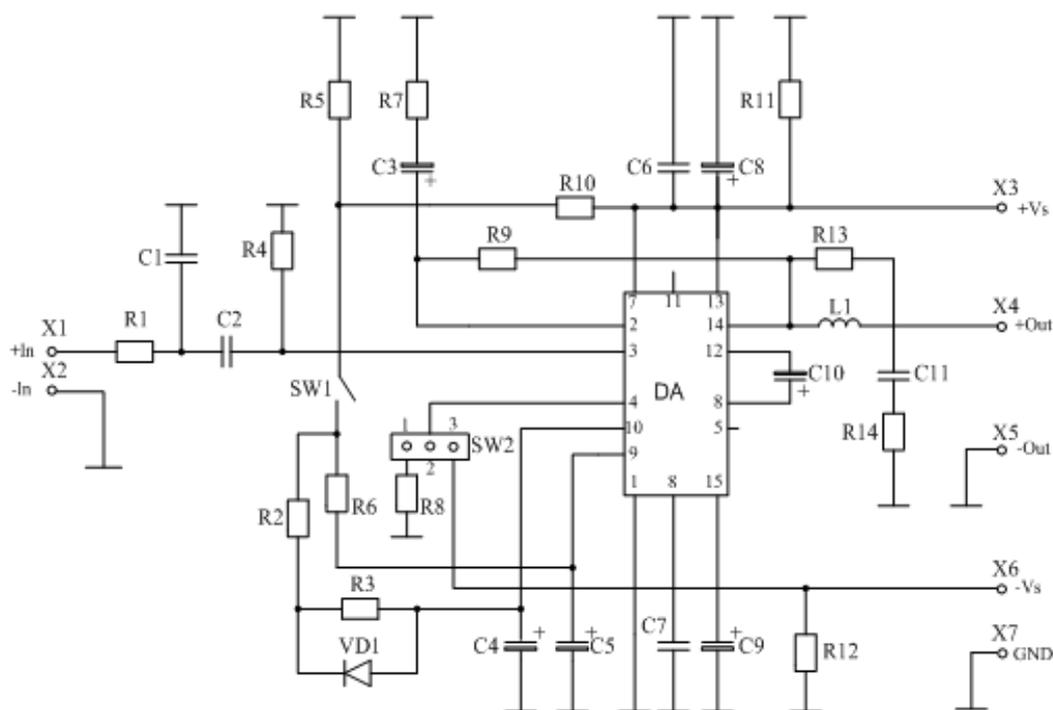


Рисунок П.1.2 – Принципиальная электрическая схема усилителя мощности

Конструктивно усилитель мощности выполнен в виде готового стандартного модуля, имеющего внешние разъемы X1÷X7. Напряжения питания подается на контакты X3(+), X6(-) и X7(общий). В свою очередь, источник сигнала подключается к выводам X1(+) и X2(общий), а нагрузка к X4(+) и X5(общий).

На рисунке П.1.3 представлена принципиальная электрическая схема фотоприёмника с усилителем мощности.

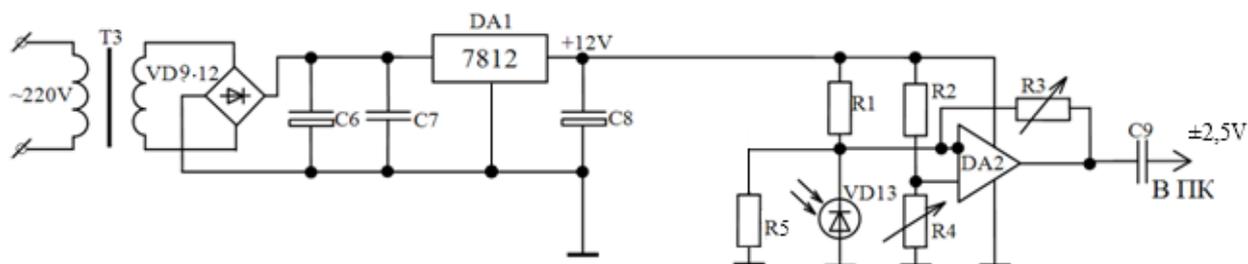


Рисунок П.1.3 –Принципиальная электрическая схема фотоприёмника с усилителем мощности

Схема фотоприёмника с усилителем мощности получает питание от сети через понижающий трансформатор Т3 и выпрямитель, собранный на диодах VD7÷12, а также конденсаторах С6, С7. Стабилизатор напряжения DA1 позволяет

получать стабильное однополярное напряжение +12В, которое питает операционный усилитель DA2, ФП VD13 и резисторный делитель R1 ÷ R5.

Коэффициент усиления усилителя DA2 регулируется резистором отрицательной обратной связи R3. Для обеспечения совместимости сигналов по постоянной составляющей между усилителем и входом канала АЦП платы ввода-вывода PCI L-783М используется конденсатор С9, который удаляет эту составляющую из сигнала.

Разработанная аппаратная часть может быть использована в составе аппаратно-программного комплекса для регистрации колебаний светового потока ламп различных типов при заданных параметрах питающего напряжения.

## Приложение 2. Патент на полезную модель №119892



Рисунок П.2.1 – Патент на полезную модель №119892