

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Системы автоматики, автоматизированного управления и проектирования

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ С. В. Ченцов

« \_\_\_\_ » июня 2017 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ  
МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 0,4 кВ**

27.04.04 Управление в технических системах

27.04.04.03 Автоматизация управления технологическими процессами в  
энергетике

Научный руководитель	_____	____.06.2017	профессор, д-р. техн. наук В. П. Довгун
Выпускник	_____	____.06.2017	Е. С. Звягинцев
Рецензент	_____	____.06.2017	доцент, канд. техн. наук Н. П. Боярская
Нормоконтролер	_____	____.06.2017	Т. А. Грудинова

Красноярск 2017

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Информационно-измерительная система для мониторинга качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ» содержит 63 страниц текстового документа, 40 рисунков, 6 таблиц, 46 использованных источников.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА,  
ФОРМАТ PQDIF, МОНИТОРИНГ, КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ,  
ГАРМОНИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ.

Объекты исследования – Здания коммерческих и крупных офисных потребителей.

Цели исследования:

- разработка информационно-измерительной системы для мониторинга качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ.

Задачи исследования:

- сравнительный анализ архитектур распределенных информационно-измерительных систем (ИИС);
- анализ специализированных форматов данных;
- разработка архитектуры и формирование распределенной ИИС контроля качества электрической энергии;
- анализ качества электрической энергии в учебных зданиях СФУ;
- разработка лабораторного практикума с удаленным доступом.

В работе исследуются различные способы и подходы построения информационно-измерительных систем для мониторинга качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4 кВ. Описаны тенденции в развитии современных информационно-измерительных систем, проведен обзор оборудования, представленного на российском рынке.

Результаты исследования оформлены в электронный лабораторный практикум кафедры СААУП, для дальнейшего анализа и работы с ними.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Контроль качества электроэнергии.....	6
1.1 Виды контроля качества электрической энергии .....	7
1.2 Выбор пунктов контроля качества электрической энергии .....	8
1.3 Длительность контроля качества электрической энергии.....	10
1.4 Требования к архитектуре информационно-измерительной системе контроля качества электроэнергии.....	11
1.5 Обзор регистраторов показателей качества электрической энергии ....	11
1.6 Обзор специализированных форматов данных .....	20
2 Информационно-измерительная система мониторинга качества электрической энергии .....	29
2.1 Архитектура распределенной информационно-измерительной системы для мониторинга качества электроэнергии .....	29
3. Анализ качества электроэнергии в трехфазных четырехпроводных сетях офисных потребителей .....	37
3.1 Учебно-лабораторный корпус университета .....	37
3.2 Офисный центр.....	44
Заключение .....	56
Список сокращений .....	59
Список используемых источников.....	60

## ВВЕДЕНИЕ

Значительное ухудшение качества электроэнергии в трехфазных четырехпроводных сетях низкого напряжения, которое наблюдается в последние годы, вызвано изменением характера электрических нагрузок офисных, коммерческих и бытовых потребителей. Основную долю нагрузок таких потребителей составляют энергосберегающие системы освещения, офисная и компьютерная техника, частотно-регулируемые электроприводы [1-3]. Особенность таких нагрузок заключается в том, что они, как правило, однофазные и имеют небольшую мощность.

Массовое применение нелинейных однофазных нагрузок в сетях крупных коммерческих и офисных потребителей приводит к значительному ухудшению качества электроэнергии. Наблюдаются значительные искажения формы токов. В ряде случаев коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока может превышать 40% [34].

Особенность однофазных нелинейных нагрузок заключается в том, что в спектре тока преобладает составляющая с частотой третьей гармоники. Гармоники, кратные 3, в трехфазных четырехпроводных сетях образуют систему нулевой последовательности и суммируются в нейтральных проводниках. Это приводит к увеличению потерь, ускоренному старению изоляции и вызванному этим сокращению срока службы электрооборудования, а в ряде случаев – к авариям, вызванным повреждением нейтрального провода [12]. Увеличение падения напряжения между нейтральной точкой и землей приводит к сбоям в работе чувствительного электронного оборудования. Высокий уровень гармоник в спектре токов оказывает отрицательное влияние на оборудование системы электроснабжения. Большие уровни токов третьей гармонической составляющей вызывают дополнительный нагрев обмоток трансформаторов.

Серьезная проблема трехфазных сетей низкого напряжения заключается в том, что неравномерное включение однофазных нагрузок может вызвать значительную несимметрию токов и напряжений сети. Это приводит к дополнительному увеличению тока нейтрального проводника.

Таким образом, изменение характера электрических нагрузок в трехфазных четырехпроводных сетях коммунальных и офисных потребителей является причиной значительного ухудшения качества электроэнергии. Увеличиваются капитальные вложения и эксплуатационные расходы, связанные с преждевременной заменой оборудования и необходимостью проводить организационные и технические мероприятия по улучшению качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Технические мероприятия по повышению качества электроэнергии включают схемные решения (выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин, использование многофазных систем выпрямления и т. п.), а также установку компенсирующих устройств, обеспечивающих регулирование одного или нескольких показателей качества электроэнергии.

Для снижения отрицательного влияния ухудшения качества электроэнергии в распределительных сетях используются специальные компенсирующие устройства – пассивные и активные силовые фильтры гармоник.

Целью работы является разработка информационно-измерительной системы для мониторинга качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи

- сравнительный анализ архитектур распределенных информационно-измерительных систем (ИИС);
- анализ специализированных форматов данных;
- разработка архитектуры и формирование распределенной ИИС контроля качества электрической энергии;

- анализ качества электрической энергии в учебных зданиях СФУ;
- разработка лабораторного практикума с удаленным доступом.

Практическая ценность работы. Проведенные исследования позволяют проектировать и реализовывать распределенные ИИС, обеспечивающие контроль качества электрической энергии в сетях коммерческих и офисных потребителей 0,4 кВ и выше.

Реализация результатов работы. В результате работы разработана информационно-измерительная система контроля качества электроэнергии. Проведены замеры и проанализировано качество электроэнергии в электросетях учебного корпуса СФУ и офисного центра. Разработана первая очередь лабораторного практикума, представленного на кафедре СААУП.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, три главы основного текста, заключение, список сокращений, список используемых источников из 46 наименований. Общий объем диссертации содержит 63 страниц текстового документа, 40 рисунков, 6 таблиц.

В первой главе рассмотрены задачи и методики контроля качества электрической энергии. Показаны рекомендуемые нормативной документацией основы построения архитектуры систем контроля качества электроэнергии и основные принципы выбора пунктов контроля качества.

Вторая глава посвящена разработке архитектуры информационно-измерительной системы контроля качества электроэнергии. Представлен сравнительный обзор форматов данных, приборов контроля качества электроэнергии.

Третья глава содержит результаты замеров качества электроэнергии в сетях потребителей 0,4 кВ учебного корпуса СФУ и офисного центра. Произведена оценка показателей качества электроэнергии на предмет соответствия установленным нормам.

## **1 Контроль качества электроэнергии**

Показатели качества электроэнергии в электрической сети определяют степень искажения напряжения сети за счет кондуктивных помех, вносимых электрооборудованием. Часть ПКЭ характеризуют установившиеся режимы работы электрооборудования и позволяют количественно оценить КЭ, особенность технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Другая часть ПКЭ характеризует кратковременные помехи, возникающие в электрической сети в результате коммутационных процессов, грозовых атмосферных явлений, работы средств защиты и автоматики. Для оценки этих ПКЭ должны измеряться амплитуда, длительность, частота и другие характеристики, установленные, но не нормируемые стандартами.

Основными задачами контроля качества электроэнергии являются:

- обнаружение помех (искажение напряжения и тока);
- оценка их значения;
- регистрация измеренных числовых характеристик в целях обработки и отображения результатов;
- проведение анализа измеренных значений ПКЭ и оценка их соответствия установленным требованиям;
- определение источника помех;
- проведение коммерческих расчетов между поставщиком и потребителем электрической энергии.

В общем случае, для организации измерений необходимо определить их цель, точку электрической сети, в которой проводится контроль КЭ, виды контролируемых ПКЭ. От этого выбора, зависит определение типа оборудования и архитектуры ИИС [13].

## 1.1 Виды контроля качества электрической энергии

Контроль качества электроэнергии заключается в проверке показателей КЭ установленным требованиям. Выделяют следующие цели контроля КЭ.

Контроль на соответствие требованиям [19] или технических регламентов. При выполнении такого контроля проводятся измерения показателей качества электроэнергии (напряжения, частота). Данный контроль осуществляется:

- органами государственного надзора;
- сертифицированными испытательными лабораториями;
- потребителем, ответственным за электрохозяйство.

Результаты контроля КЭ представляются за весь интервал наблюдения, и на их основании делается вывод о соответствии качества электроэнергии установленным требованиям.

Диагностический контроль необходим для анализа причин ухудшения КЭ, определения виновника снижения КЭ, при проверке выполнения технических условий на присоединения потребителя к электрической сети и договорных условий на электроснабжение. При данном контроле, помимо основных ПКЭ, регистрируются дополнительные параметры, характеризующие качество ЭЭ по току и мощности.

Результаты данных измерений предоставляются в числовом и графическом виде. Для построения графиков используются усредненные на коротких интервалах времени показатели КЭ. Длительность интервалов выбирается в зависимости от технологического процесса и обычно составляет 1-30 мин.

Коммерческий контроль применяется как средство экономического воздействия на виновника ухудшения КЭ. Если возможность данного

контроля установлена договором электроснабжения, при фиксации отклонении показателей КЭ от нормированных значений, виновнику назначается неустойка или штраф. В данном случае регистрируются показатели КЭ по напряжению, току и мощности, также проводится учет отпущенной электроэнергии.

Технологический контроль КЭ – контроль, производимый с длительностью и (или) погрешностью измерений, которые могут быть снижены, по сравнению с [19]. Для проведения подобного контроля могут использоваться более простые и дешевые средства измерения. Задачей технологического контроля является установление влияния технологического процесса потребителя на качество электроэнергии [13].

В зависимости от длительности измерений выделяют два вида контроля КЭ:

- периодический контроль, при котором показатели контролируются каждые 24 ч (или несколько суток), с постоянными интервалами, определяемыми в [20];
- непрерывный контроль, при котором поступающая информация о ПКЭ анализируется непрерывно. Такой контроль осуществляется с помощью стационарно установленных приборов.

## **1.2 Выбор пунктов контроля качества электрической энергии**

Пункт контроля качества электрической энергии – участок электрической сети, на котором проводят измерение показателей качества электрической энергии при контроле качества электрической энергии (КЭ).

В качестве пункта контроля КЭ может быть использована точка общего присоединения, граница раздела балансовой принадлежности, выводы приемников электрической энергии и другие точки электрической сети.

В электрической сети одного центра питания (ЦП) допускается проводить контроль показателей КЭ в пунктах контроля, соответствующих ближайшей к ЦП и наиболее удаленной от ЦП точках передачи ЭЭ.

Распределительные линии группируют по доминирующему (если это возможно) характеру графиков нагрузки:

- линии с промышленной нагрузкой;
- линии с нагрузкой общественных, учебных, коммерческих учреждений;
- линии питания жилых зданий;
- и др.

Дополнительно выделяются точки передачи с графиком нагрузки резко отличающимся от графика нагрузки ЦП.

В случае претензионных испытаний, ПК выбирают точку передачи ЭЭ потребителю, заявившему претензию.

Органы государственного надзора выбирают ПК в точках передачи электрической энергии самостоятельно.

Испытания в целях контроля КЭ проводят в любых режимах работы электрической сети, кроме аварийного режима, а также кроме режимов, обусловленных:

- исключительным погодными условиями и стихийными бедствиями;
- непредвиденными ситуациями, вызванными действиями стороны, не имеющей отношения к снабжающей организации и потребителю ЭЭ (пожар, взрыв, военные действия и т.п.);
- условиями, регламентированными государственными органами управления, также связанными с ликвидацией последствий вышеназванных условий;

– в условиях введения в отношении потребителя режима ограничения потребления электрической энергии.

При проведении испытаний ЭЭ в ПК обеспечивают выполнение условий эксплуатации средств измерений, исключают влияние электромагнитных помех на измерительный комплекс. [20]

Результаты испытаний на соответствие ЭЭ нормам КЭ, установленным в [19], оформляют протоколом испытаний ЭЭ. Рекомендуемая форма протокола приведена в [20].

### **1.3 Длительность контроля качества электрической энергии**

При проведении контроля КЭ в целях проверки соответствия электрической энергии нормам КЭ, установленными в [19], в том числе при проведении арбитражных и сертификационных испытаний ЭЭ, при инспекционном контроле уже сертифицированной ЭЭ проводят непрерывные измерения значений показателей КЭ в течение не менее одной недели (7 календарных дней).

Продолжительность непрерывных измерений показателей КЭ при рассмотрении претензий к КЭ устанавливается соглашением между сетевой организацией и конечным потребителем, но не менее одних суток

Число маркированных данных, не учитываемых при оценке соответствия показателей КЭ установленным нормам, не должно превышать 5% общего числа усредненных на 10-минутных интервалах значений показателей КЭ в каждые сутки из общего периода времени непрерывных измерений [20].

## **1.4 Требования к архитектуре информационно-измерительной системе контроля качества электроэнергии**

Функционально информационно-измерительная система должна обеспечивать сбор, хранение, проверку и обработку данных КЭ и публикацию результатов. Рекомендуется визуализация текущих параметров качества электрической энергии с интервалом объединения 3 с.

В ИИС рекомендуется использовать формат PQDIF для предоставления и передачи данных КЭ. Также система должна обеспечивать работу с файлами формата XML, XLS/CSV, Comtrade.

Система должна обеспечивать веб-доступ к данным КЭ. Должны быть обеспечены условия для внедрения отчетности в режиме «он-лайн».

Система должна обладать удаленной системой диагностики, обеспечивающей передачу информации о состоянии средств измерений, серверного оборудования, устройств синхронизации времени и других компонентов [20].

## **1.5 Обзор регистраторов показателей качества электрической энергии**

Приборы контроля показателей качества электрической энергии все чаще находят место в инструментарии службы эксплуатации электроустановок. Их использование позволяет фиксировать и оценивать показатели качества электрической энергии, изучать свойства электрических нагрузок, измерять энергию и мощность.

Современный рынок предоставляет для конечного потребителя множество производителей приборов контроля качества электрической энергии, как российский, так и зарубежных компаний:

- Парма РК;
- Энерготестер/Энергомонитор;

- Satec PM;
- Fluke;
- Ресурс ПКЭ;
- Прорыв КЭ;
- Sonel;
- Circutor;
- и др.

Существует три основных исполнения данных приборов:

- Стационарный;
- Переносной;
- Комбинированный с другим прибором (в основном с счетчиком электрической энергии).

По способу подключения к измерительным цепям приборы контроля ПКЭ делятся на следующие три подгруппы:

- Прямого включения;
- Трансформаторного включения;
- Универсальные.

По охватываемому функционалу приборы контроля ПКЭ делятся на:

- Измерение значений показателей нагрузок и качества ЭЭ;
- Анализ и вывод отчетных данных по показателям качества ЭЭ;
- Регистрация и фиксация аномальных событий.

## 1.5.1 Анализатор качества электрической энергии SATEC PM175



Рисунок 1.1 Анализатор качества SATEC PM175

Основные характеристики:

Многофункциональный 3-фазный прибор (реальные действующие значения (RMS), напряжения, токи, мощности,  $\cos\phi$ , ток нейтрали, несимметрия напряжений и токов, частота)

Многотарифная система учёта электроэнергии, класс точности 0,2S  
МЭК 62053-22:2003

Возможность подключения внешнего дисплея.

Функциональные возможности:

- Мониторинг электрической сети, осциллографирование по 6 каналам (3 входа напряжения, 3 входа тока);
- Анализ качества электроэнергии в соответствии со стандартами [15, 19, 34, 35];
- КИС по току и напряжению, индивидуальные гармоники (до 50), фликер;
- Регистрация более 100 параметров, по уставкам или по времени, регистрация осциллограмм;
- Наличие часов реального времени (RTC).

#### Часы реального времени (RTC):

- Энергонезависимые часы и календарь, погрешность хода 0,5 сек/день
- Присвоение меток времени
- Синхронизация времени по каналу связи или по дискретному входу

#### Аварийная сигнализация и управление:

- 16 управляющих триггеров, программируемые уставки
- 2 программируемых релейных выхода 3А, 250В
- 2 дискретных входа, 2 аналоговых входа/выхода
- Запись и хранение графиков нагрузки

#### Коммуникация:

- 2 независимых порта связи
- (RS-232, RS-422, RS-485, модем, Ethernet, Profibus DP)
- Протоколы: Modbus RTU, ASCII, DNP 3.0

#### Защита:

- Полная гальваническая изоляция цепей токов и напряжений. 6кВ пульс
- Опциональное пломбирование корпуса. Защита паролем
- Контроль несанкционированного доступа

В зависимости от предполагаемого типа использования можно заказать версию с цветным сенсорным дисплеем, цифровым индикатором или вовсе – без них. Существует переносная версия данного анализатора.



Рисунок 1.2 SATEC EDL175 - переносной анализатор качества электроэнергии. Портативное исполнение PM175.

Переносной анализатор EDL175 измеряет, регистрирует и анализирует события и данные электрической сети. EDL175 соответствует требованиям широкого спектра прикладных задач от анализа качества электроэнергии до энергоаудита и записи трендов параметров и формы волны в течение определённого промежутка времени.

Прибор оснащён аккумулятором и измерительным поясом Роговского для измерения токов 30A/300A/3000A (Flex Sensor).

### **1.5.2 Трёхфазные регистратор качества электроэнергии Fluke 1736**



Рисунок 1.3 Регистратор качества электроэнергии 1736

Трехфазный регистратор потребляемой мощности Fluke 1736, совместимый с мобильным приложением Fluke Connect® и программой для настольного компьютера, предоставляет данные, необходимые для принятия критических решений относительно качества электроэнергии в реальном времени. Отличный тестовый инструмент для энергетических исследований и регистрации показателей качества электроэнергии, 1736 автоматически получает и регистрирует более 500 параметров качества электроэнергии, обеспечивая лучший обзор данных, необходимых для оптимизации надежности и экономичности системы.

Оптимизированный пользовательский интерфейс, гибкие датчики тока и интеллектуальная функция проверки измерений, которая позволяет уменьшить количество ошибок измерения благодаря цифровой проверке и коррекции типичных ошибок подключения уменьшают неопределенность измерения. Удаленный доступ и обмен данными осуществляется через приложение Fluke Connect®, что позволяет оставаться на безопасном рабочем расстоянии и принимать важные решения в режиме реального времени, уменьшая необходимость в защитных средствах, посещениях объекта и контроле. Позволяет быстро и легко отобразить график измерений, чтобы выявить проблемы и составить подробные отчеты, с помощью пакета программного обеспечения Fluke Energy Analyze Plus.

Основные измерения: Автоматическое получение и регистрация значений напряжения, силы тока, мощности, коэффициента мощности, потребляемой электроэнергии и связанных с ними параметров

Совместимость с Fluke Connect®: Просмотр данных локально на приборе или через мобильное приложение Fluke Connect и программное обеспечение для настольного компьютера или через инфраструктуру WiFi предприятия

Удобная подача питания на прибор: Питание прибора непосредственно от измеряемой цепи

Наивысший рейтинг безопасности в отрасли: Соответствует стандартам безопасности 600 В CAT IV/1000 В CAT III для использования на технологическом входе и на более низких уровнях

Измерение всех трех фаз и нейтрали. С 4 гибкими токоизмерительными датчиками в комплекте.

Подробная регистрация: В приборе может быть сохранено более 20 отдельных сеансов регистрации. Фактически, все измеренные значения автоматически регистрируются, так что вы не потеряете тенденции измерения. Их даже можно изучать во время сеансов регистрации и перед загрузкой для анализа в режиме реального времени.

Обнаружение провалов, выбросов и пусковых токов: Включает в себя снимок сигнала события и RMS профиль высокого разрешения вместе с указанием даты, метки времени и серьезности, чтобы помочь определить потенциальные первопричины проблем качества электроэнергии.

Яркий цветной сенсорный экран: Выполнение удобного в полевых условиях анализа, а также проверок данных с полным графическим изображением.

Оптимизированный пользовательский интерфейс: Получайте точные данные каждый раз при помощи быстрых пошаговых графических настроек, будьте уверены в правильности подключений благодаря функции интеллектуальной проверки.

Полная настройка в «полевых условиях» на передней панели или в приложении Fluke Connect: нет необходимости возвращаться в мастерскую для загрузки и установки или нести компьютер к электрическому шкафу.

Прикладное программное обеспечение Energy Analyze Plus: Скачайте и проанализируйте каждую деталь потребления и качества электроэнергии с помощью нашей автоматизированной системы отчетности.

Данные приборы изготавливаются в портативном варианте, при необходимости можно заказать дополнительные принадлежности, расширяющие функционал и диапазон измеряемых величин данного прибора.

### **1.5.3 Измеритель показателей качества электрической энергии Ресурс-UF2С**



Рисунок 1.4 Измеритель ПКЭ Ресурс-UF2С

Прибор предназначен для:

- автоматического измерения показателей качества электрической энергии;
- оценки соответствия установленным нормам;
- измерений параметров напряжения, силы тока, мощности и энергии переменного трехфазного и однофазного тока;

- определения метрологических характеристик счетчиков электрической энергии, имеющих менее точный класс точности;
- определения режимов работы измерительных трансформаторов тока.

Область применения: измерение показателей качества электрической энергии, организация учета количества электрической энергии на предприятиях промышленности и в энергосистемах, обследование электросетей предприятий (энергоаудит), учет потоков мощности в энергосистемах, межсистемных перетоков, выработки и использования электрической энергии.

Прибор предназначен для работы в однофазных, трехфазных трехпроводных, трехфазных четырехпроводных и трехфазных пятипроводных электрических сетях при непосредственном подключении или с использованием измерительных трансформаторов.

Прибор имеет как портативное, так и стационарное исполнение.

Измеряемые параметры:

- Показатели качества электрической энергии;
- Значения напряжения;
- Значения силы тока;
- Углы фазовых сдвигов;
- Мощность;
- Энергия.

Максимальный срок хранения зафиксированных показателей – 1 год.

Интерфейс передачи данных:

- RS-232;
- RS-485.

## **1.6 Обзор специализированных форматов данных**

При проведении наблюдений за показателями качества электрической энергии в различных электроустановках, неотложно встает вопрос обработки, хранения и передачи полученных данных. Заказчику обследования обычно достаточно отчета формы, устанавливаемой [20].

Для связи с базой данных информационной системы мониторинга показателей качества электрической энергии и для обмена с другими системами этого недостаточно. Отсюда – потребность в структурированном формате.

### **1.6.1 Формат COMTRADE**

Формат COMTRADE (акроним от Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems) - это международный формат, предназначенный для хранения информации о значениях и параметрах электрических сигналов ( типа "ток", "напряжение", и "дискретные (контактные) сигналы", считанных из промышленных электросетей.

Считывание электрических сигналов в течение определенного промежутка времени происходит как правило при регистрации аварийных ситуаций в электросетях.

Регистрация производится специальными приборами - аварийными регистраторами, после чего поступивший сигнал оцифровывается регистратором и записывается в специальный файл, который передается с накопителя информации в регистраторе на жесткий диск компьютера по специальной локальной сети. Установленное на компьютере специальное программное обеспечение использует полученные данные для анализа ситуации и отображения, как результатов этого анализа, так и самих полученных данных (осциллограмм, или, как еще принято их называть -

регистрограмм). При этом очень часто ПО отображения на компьютере дополнительно конвертирует полученные из устройства регистрации данные в свой собственный внутренний формат.

Поскольку внутренние форматы, в которых обрабатывают и анализируют аварийные осциллограммы программы от разных производителей сильно различаются между собой, был создан универсальный текстовый формат записи аварийной электротехнической информации COMTRADE для того чтобы любая программа отображения и анализа осциллограмм могла пользоваться данными, зарегистрированными на устройстве любого стороннего производителя и обработанными программой от какой-либо сторонней группы разработчиков и предоставлять программам других разработчиков пользоваться теми данными осциллограмм которые она использует. Для этого было введено правило, в соответствии с которым, любая программа, отображающая и анализирующая данные аварийных электрических сигналов - аварийных осциллограмм, и использующая в своей работе собственный формат обработки этих данных, должна уметь конвертировать эти данные и результаты своей работы с ними как из собственного формата в формат COMTRADE, так и из формата COMTRADE в свой собственный формат, и наличие вышеуказанной возможности есть одно из главных условий конкурентоспособности и популярности программных продуктов созданных для анализа, регистрации, и отображения электрических сигналов в промышленных электросетях.

## 1.6.2 Формат PQDIF

PQDIF (акроним от Power Quality Data Interchange Format) - формат данных, предназначенный для хранения информации о качестве электроэнергии. Главной целью этого формата является обеспечение программной кроссплатформенности, то есть, чтобы данные сохраненные в PQDIF формате открывались во всех пакетах программного обеспечения для контроля качества электроэнергии. Формат PQDIF поддерживается стандартом [33] специальной группы по мониторингу качества электрической энергии. Работа над ним проводилась при финансовой поддержке комитета по качеству электроэнергии IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers; Институт инженеров электротехники и электроники). [33] был сформирован в 1996 году рабочей группой IEEE P1159. Первая версия этого стандарта была выпущена в 2002 году и подтверждена в ходе голосования в 2003 году.

Таблица 1.1 - Форматы данных, типы данных и используемые атрибуты форматов COMTRADE и PQDIF

	COMTRADE	PQDIF
Формат данных	Бинарный	
	ASCII	
Типы данных	Целое число со знаком (1,2 или 4 байта)	
	Целое число без знака (1,2 или 4 байта)	
	Логическое выражение (1,2 или 4 байта)	
	-	Вещественное число (4 байта единичной или 8 байт двойной точности)
	-	Комплексное число (8 байт единичной или 16 байт двойной точности)
	-	Символьный тип (1 байт ASCII или 2 байта Unicode)
	-	Штамп даты (12 байт)
-	Глобально уникальный идентификатор (GUID) (16 байт)	

	COMTRADE	PQDIF
Атрибуты	Типы величин - аналоговая или состояние	Типы величин - форма сигнала, вектор, журнал значений
	Измеряемые величины - напряжение, ток и др.	Измеряемые величины - напряжение, ток, мощность, энергия, температура
	Характеристики измерений – выборка	Характеристики измерений - мгновенное значение, среднеквадратичное значение, коэффициент гармоник и др.
	Последовательные выборки измерительных единиц -вольты, амперы и др.	Последовательные выборки измерительных единиц -вольты, амперы, ватты, вар и др.
	Выборка типов значений -time, val	Выборка типов значений - time, val, min, max, avg
	ID канала	Фаза или ID канала

Этот стандарт значительно отличается от формата обмена данными COMTRADE, который преимущественно предназначен для данных, представленных в форме сигналов, но не очень удобен для других типов данных о качестве электроэнергии, таких как среднеквадратичное значение напряжений, спектр гармоник, вероятностей и других.

Таблица 1.2 – Производители анализаторов качества электроэнергии, поддерживающие формат PQDIF

Производители анализаторов КЭ, поддерживающие формат PQDIF
SATEC
ISKRA
Dranetz-BMI
Power Monitors (PMI)
PSL Power Standards Labs
Schneider Electric/Square D
SoftSwitching Technologies
Electrotek Concepts

Одной из главных особенностей PQDIF формата является разделение понятий физической и логической структуры, которые в свою очередь также подразделяются на два уровня – верхний и нижний.

Таблица 1.3 – Четыре аспекта PQDIF формата

Структура	Уровень	
	Верхний	Нижний
Физическая	Структура заголовка записи	Структура тела записи
Логическая	Скрытая иерархия записи	Тэги и определения иерархии

Физическая структура определяет, как разные типы данных хранятся в файле. Логическая структура определяет, как физические данные могут интерпретироваться как данные о качестве электроэнергии.

Физическая структура формата PQDIF использует относительно простую иерархию. На верхнем уровне файл состоит из одной или нескольких записей (Record).

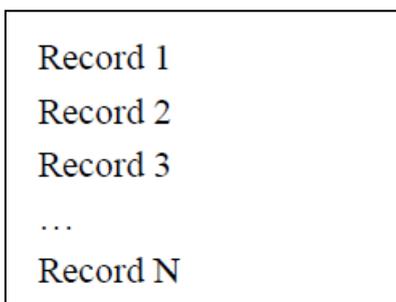


Рисунок 1.5 – Верхний уровень физической структуры PQDIF файла

Такой тип связи позволяет гибко использовать структуру записей без переписывания всего файла заново.

Нижний уровень физической структуры представляет собой разбиение каждой записи на набор элементов:

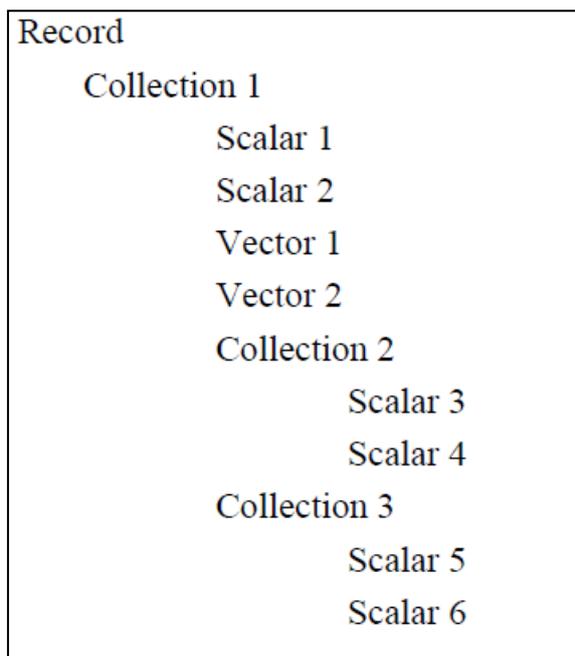


Рисунок 1.6– Нижний уровень физической структуры PQDIF файла

Каждый элемент может представляться одним из трех типов: скалярная величина (одно значение), векторная величина (выборка или массив) или набором элементов (Collection).

Скалярный и векторный тип величин («Scalar» и «Vector») являются одними из фиксированных типов переменных в PQDIF файле. Полный список типов переменных представлен в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Типы данных PQDIF файла

Название	Описание
BOOL1	1 байтовая булевская переменная
BOOL2	2х байтовая булевская переменная
BOOL4	4х байтовая булевская переменная
CHAR1	символ ASCII
CHAR2	символ Unicode
INT1	1 байтовое целое
INT2	2х байтовое целое
INT4	4х байтовое целое
UINT1	1 байтовое целое число без знака
UINT2	2х байтовое целое число без знака
UINT4	4х байтовое целое число без знака
REAL4	4х байтовое вещественное

Название	Описание
REAL8	8ми байтовое вещественное
COMPLEX8	4х байтовое комплексное число
COMPLEX16	8ми байтовое комплексное число
DT	Штамп даты
GUID	16 байтовый глобально уникальный идентификатор

Логическая структура определяет ряд правил, как записи и элементы записей должны быть организованы, чтобы их совокупность представляла собой данные о качестве электроэнергии.

Таблица 1.5 - Пример ряда элементов логического слоя PQDIF

Элемент логического слоя	Пример
Производитель оборудования	Dranetz-BMI, PML, RPM, Square D, Sentry
Модель оборудования	8010,7100,Omega,ION,DL8000,3P
Тип величин	минимальное/максимальное/среднее значение
Единицы измерения	секунды, вольты, амперы

Верхний уровень логической структуры начинается с записи контейнера (Container record), которая включает в себя записи источников данных (Data Source records). Каждая запись источника данных (Data Source record) включает в себя параметры мониторинга (Monitor Settings) и сами данные мониторинга (Observation records).

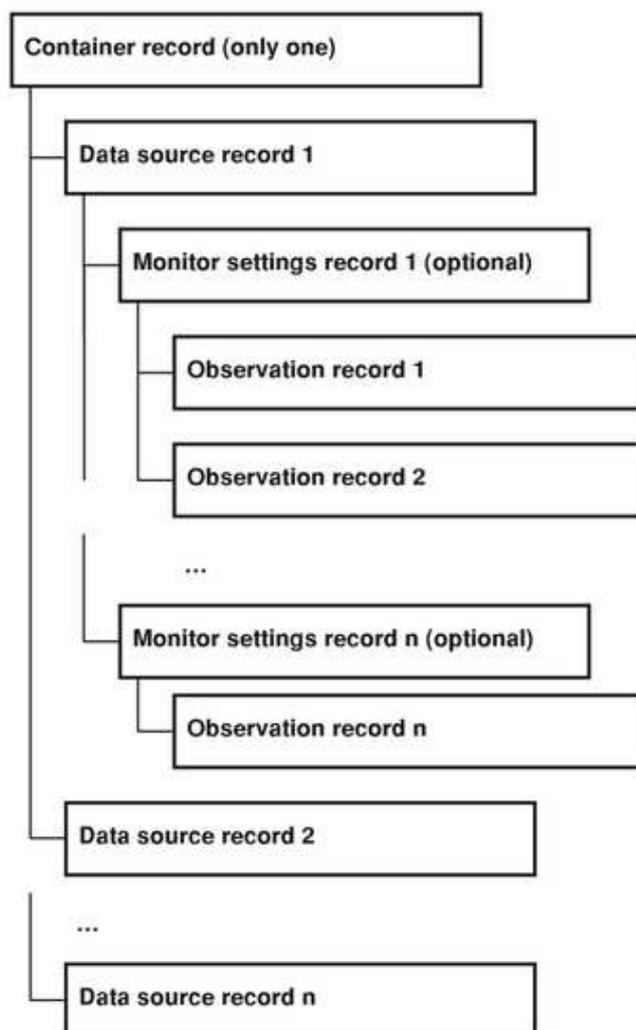


Рисунок 1.7 – Верхний уровень логической структуры PQDIF файла

Помимо этого логическая структура включает в себя: тэги (Tag), идентификаторы (ID), каналы (Channels).

Тэги и идентификаторы являются основой логической структуры PQDIF. Каждый элемент PQDIF имеет тег, который идентифицирует значение элемента. Например, первичный набор элементов каждой записи имеет тег, определяющий тип записи. Идентификаторы представляют собой диапазон значений, которые может иметь тэг. Спецификации PQDIF определяют стандартный набор тегов и для каждого тега, связанный с ним тип элемента, его место в иерархии элемента записи, и ее диапазон значений идентификаторов.

Каждое значение тега осуществляется с использованием глобально уникального идентификатора (GUID). Значения идентификатора ID необязательно могут быть реализованы в виде GUID или целочисленных значений в зависимости от обстоятельств.

Канал представляет собой один из множества потоков данных, которые генерируются во время мониторинга. Каждый канал должен иметь уникальное значение (например, среднеквадратичное напряжение) и фазу (например, фаза A-N).

Записи источника данных содержат наборы определений для каналов. Эти наборы содержат элементы, которые определяют значение, фазу, единицы измерения и другие параметры канала. Значения, содержащиеся в определении канала не меняются с течением времени. Многие данные мониторинга разделяют одну запись источника данных. Это позволяет избежать дублирования определений в каждой записи.

Записи источника данных, настройки мониторинга и данные мониторинга связаны в определенном порядке в PQDIF файле. Записи источника данных должны быть перед параметрами мониторинга и самих данных мониторинга, которые ссылаются на него. Кроме того, параметры мониторинга должны быть перед данными мониторинга, которые ссылаются на него.

## **2 Информационно-измерительная система мониторинга качества электрической энергии**

### **2.1 Архитектура распределенной информационно-измерительной системы для мониторинга качества электроэнергии**

Информационно-измерительная система для анализа качества электроэнергии – совокупность определенным образом соединенных между собой средств измерений и других технических устройств, реализующая процесс измерений и обеспечивающая автоматическое или автоматизированное получение данных об изменяющихся во времени и распределенных в пространстве физических величинах, характеризующих определенные свойства или состояния объекта измерений. Такая система выполняет следующие функции:

- получение исходной информации в результате взаимодействия первичных измерительных преобразователей (сенсоров) с объектом измерений;
- преобразование измерительной информации с заданной и гарантированной точностью;
- хранение полученной измерительной информации.

Основными компонентами ИИС являются:

- измерительный комплекс;
- подсистема сбора данных;
- система обеспечения единого времени (СОЕВ);
- система управления базой данных (СУБД);
- web-сервер;
- интерфейс пользователя.

Архитектура информационно-измерительной системы показана на рисунке 2.1.



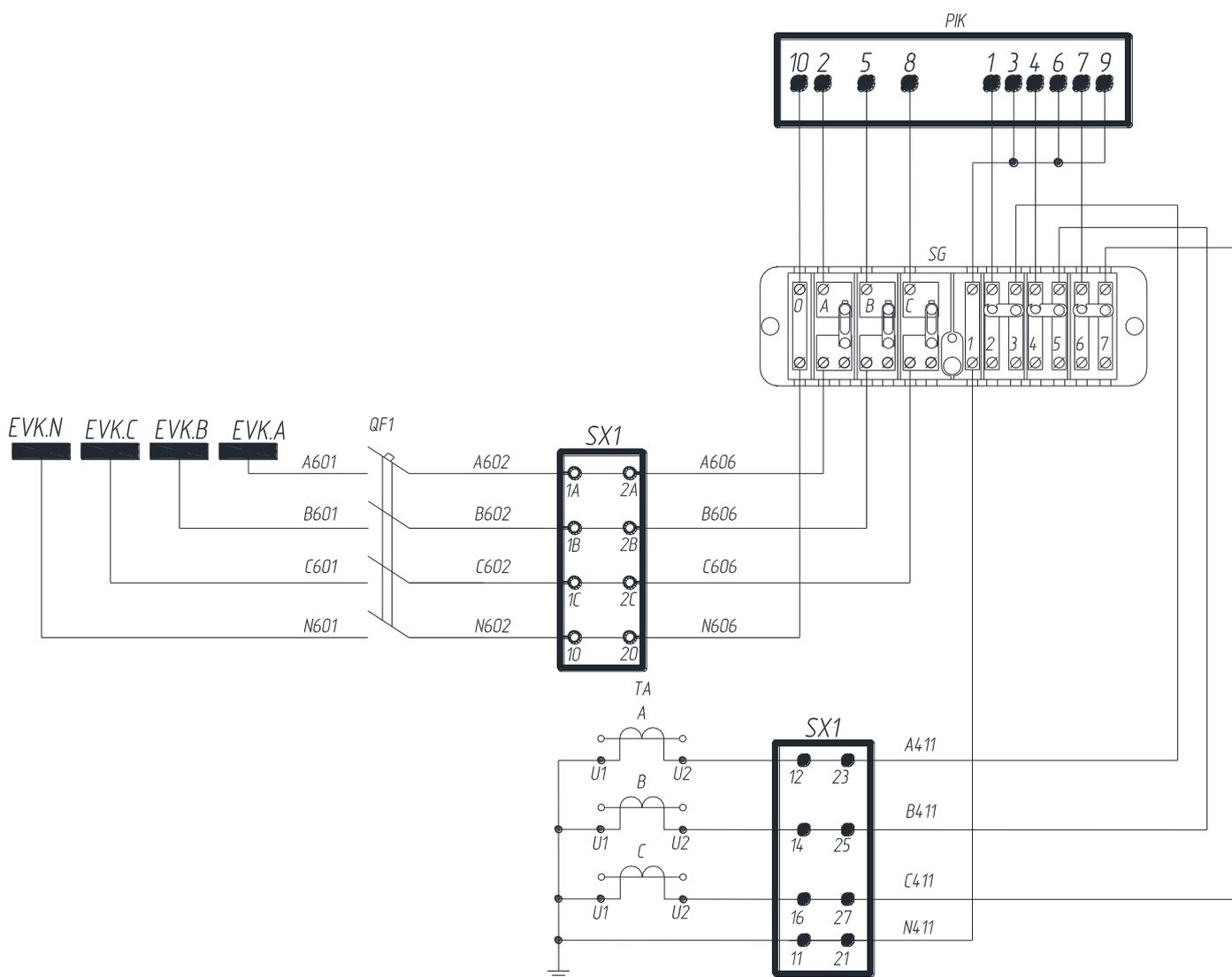
Рисунок 2.1. Архитектура информационно-измерительной системы анализа качества электроэнергии

Далее приведено описание организуемой распределенной системы мониторинга качества электроэнергии, собирающей показания для дальнейшего использования их в лабораторном практикуме.

Единое системное время обеспечивается синхронизацией на сервере с сервером точного времени (NTP), а также с помощью приемников систем GLONASS, GPS. Далее обеспечивается синхронизация времени на всех элементах системы.

Измерительный комплекс представляет собой совокупность измерительных трансформаторов тока и напряжения, анализатор качества электроэнергии и электрические цепи между ними. Выполняет функцию измерения показателей качества электрической энергии.

Схему подключения измерительных цепей прибора контроля качества электрической энергии, можно увидеть на рисунке 2.2.



- PIK – прибор контроля качества электрической энергии;
- SG и SX – испытательные и соединительные клеммники;
- QF – автоматический выключатель, применяемый для защиты и коммутации цепей напряжения;
- TA – трансформаторы тока;
- EVK.x – шинки цепей напряжения.

Рисунок 2.2 Схема подключения измерительных цепей прибора

Подсистема сбора данных представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенная для интеграции измерительных приборов в информационную систему. В качестве физического уровня передачи данных используется протокол RS-485 (асинхронный интерфейс). Для организации прикладного уровня передачи данных используется открытый коммуникационный протокол, основанный на архитектуре ведущий-ведомый

(master-slave) Modbus RTU. Одна из возможных схем физического подключения устройств подсистемы системы представлена на рисунке 1.3.

Подсистема сбора данных реализована на графическом языке «G» в программной среде LabVIEW. Для программирования задач ввода-вывода и обработки сигналов, не требующих высокого быстродействия обслуживающей программы, система LabVIEW является чрезвычайно удобной. Преимущества использования системы LabVIEW заключаются в следующем:

- большое количество библиотек для интеграции измерительного оборудования и программных средств;
- наличие мощной математической библиотеки для обработки данных;
- ведущие производители измерительного оборудования снабжают свою продукцию драйверами для взаимодействия с LabVIEW.



Рисунок 2.3. Схема физических соединений устройств

Подсистема сбора данных генерирует запросы о передачи данных к анализаторам качества электроэнергии через определенные интервалы времени, которые отстраиваются на сервере ИИС. При получении данных от прибора подсистема производит первичную обработку показаний и запускает механизмы взаимодействия с СУБД, в которой формируются таблицы с данными. Для организации доступа подсистемы сбора данных к СУБД был

использован программный интерфейс ODBC, с вариантом подключения UDL.

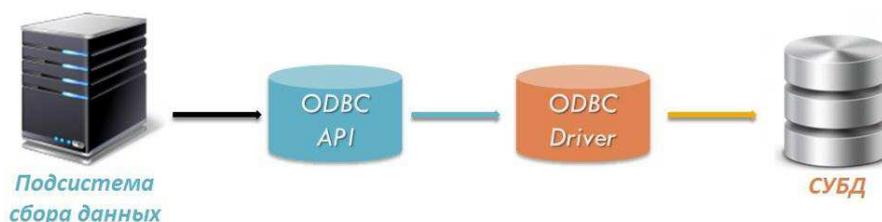


Рисунок 2.4. Схема взаимодействия LabVIEW с СУБД

В качестве системы управления базами данных в ИИС используется реляционная СУБД MySQL. Гибкость СУБД MySQL обеспечивается поддержкой большого количества типов таблиц, открытой архитектурой, GPL-лицензированием и кроссплатформенностью.

Для хранения результатов измерений в БД была использована структура данных, аналогичная унифицированному формату PQDIF (Power Quality Data Interchange Format) разработанному в 1996 году рабочей группой IEEE P1159 [33].

Одной из главных особенностей используемого формата данных является разделение понятий физической и логической структуры, которые также подразделяются на два уровня – верхний и нижний.

Таблица 2.1 – Физическая и логическая структура данных

Структура	Уровень	
	Верхний	Нижний
Физическая	Структура заголовка записи	Структура тела записи
Логическая	Скрытая иерархия записи	Тэги и определения иерархии

Физическая структура определяет, как хранятся разные типы данных.

Данные показателей качества электроэнергии разделяются на три вида элементов записей:

- Скаляр. Отдельное значение какого-либо физического параметра;
- Вектор. Массив физических параметров;
- Прочие элементы, например, указатели связи с другими элементами.

Физическая структура использует относительно простую иерархию. Верхний уровень структуры состоит из одной или нескольких записей. Данный тип связей позволяет гибко производить запись новых измерений в БД. Нижний уровень физической структуры представляет собой разбиение показателей качества электроэнергии на наборы определенных измерений КЭ, это позволяет снизить время и вычислительные мощности при первичной обработке измерений.



Рисунок 2.5. Верхний уровень физической структуры хранения данных в БД

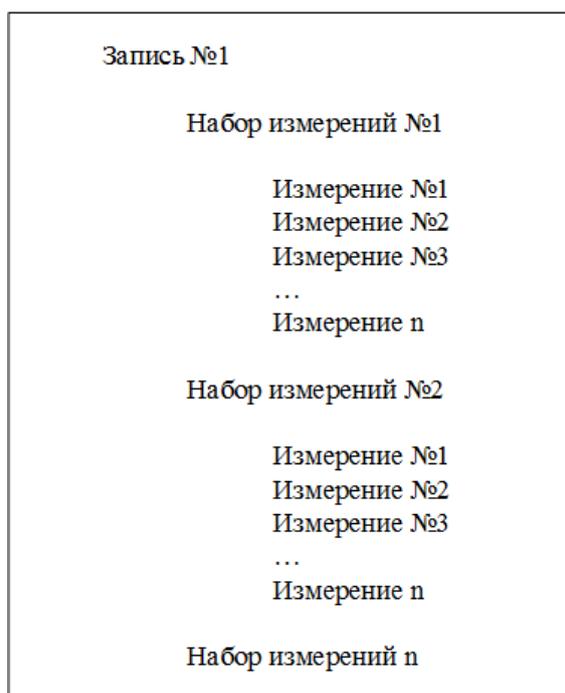


Рисунок 2.6. Нижний уровень физической структуры хранения данных в БД

Логическая структура определяет, как физические данные могут интерпретироваться как данные о качестве электроэнергии. На логическом уровне структура данных представляет иерархию записей, содержащих информацию об источниках данных, настройках измерительных приборов и результатов измерений. Логическая структура хранения данных в базе данных представлена на рисунке 2.7.

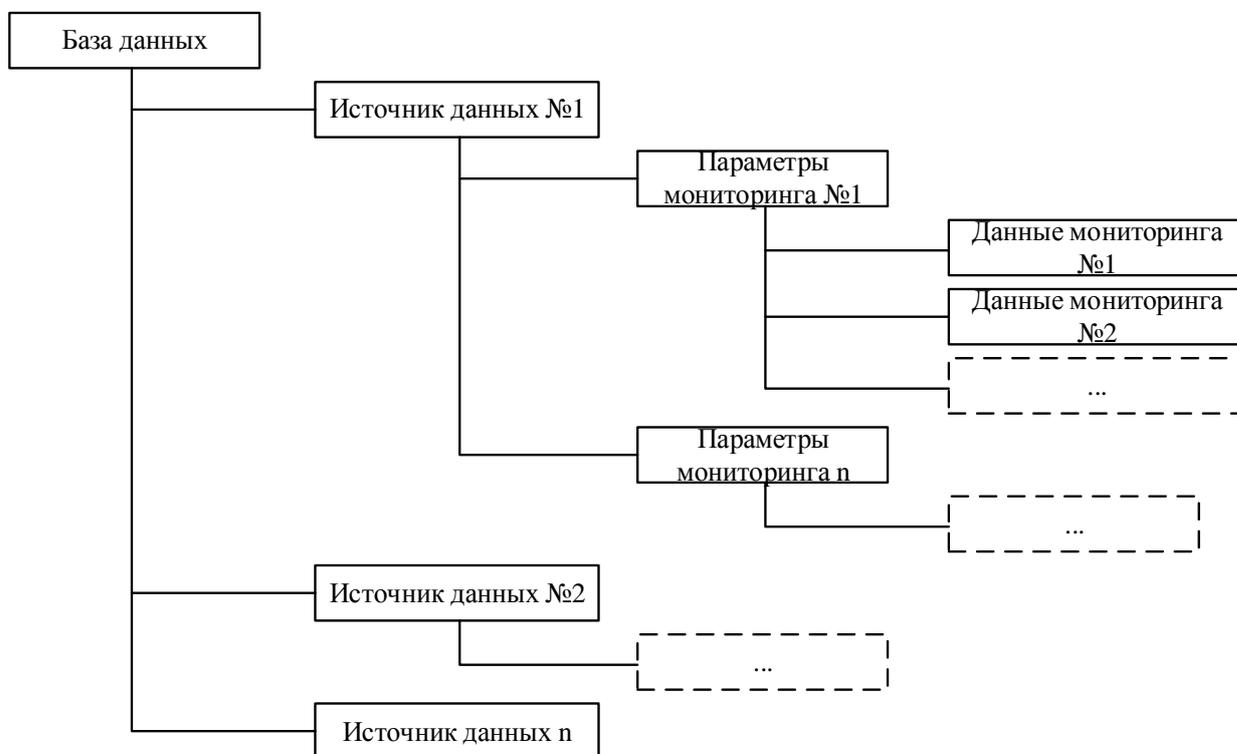


Рисунок 2.7. Логическая структура хранения данных в БД

В качестве web-сервера использован сервер Apache HTTP. Основными преимуществами сервера Apache являются: широкие возможности, удобство администрирования, эффективность, производительность, а также

кроссплатформенность. Запросы пользователей отправляются на сервер в виде XML сообщений, либо через POST и GET запросы через TCP/IP модели.

Пользовательский интерфейс представляет собой web-сайт, который работает в браузере пользователя. Все вычислительные операции (первичная обработка) производятся на стороне web-сервера. Для организации взаимодействия web-сервера и базы данных использовался скриптовый язык PHP. Графический интерфейс пользователя разработан с помощью языка разметки HTML и языка описания внешнего вида документа CSS. Для визуализации данных в виде графиков применены библиотеки, разработанные на языке JavaScript. Для оптимизации и увеличения скорости обмена информации между клиентом и сервером использован AJAX-запрос, это низкоуровневый метод позволяет производить обмен данными браузера и сервера в фоновом режиме.

Web-сайт позволяет визуализировать показания анализатора качества электрической энергии в виде графиков и таблиц. Внедрены механизмы детальной настройки отображения графиков (установка определенного временного интервала, выбор величин, сохранение графиков в виде рисунка в форматах JPG, PNG, PDF). Динамический web-сайт позволяет отслеживать действующие значения и спектральный состав токов и напряжений сети в режиме онлайн.

### **3. Анализ качества электроэнергии в трехфазных четырехпроводных сетях офисных потребителей**

#### **3.1 Учебно-лабораторный корпус университета**

Учебно-лабораторный корпус расположен в новом здании, сданном в эксплуатацию после 2000 года. Питание потребителей осуществляется от двух трансформаторов мощностью 400 кВА. Основными потребителями являются компьютеры, офисное оборудование и осветительная нагрузка. Общее число персональных компьютеров, установленных в компьютерных классах и аудиториях учебно-лабораторного корпуса, более двухсот. Учебные занятия проводятся с 8-30 до 22-00. Крупной нагрузкой является система электропитания и охлаждения суперкомпьютера, работающая непрерывно.

На рисунке 3.1 представлены результаты измерений фазных токов и тока в нейтральном проводе. Анализ полученного графика показал, что величина тока нейтрального провода не превышает фазные токи. В период максимальной нагрузки на сеть величина тока в фазах достигает 35 ампер, а величина тока нейтрального провода 15 ампер. Наличие тока в нейтральном проводе связано с несимметричным распределением нагрузки по фазам сети, а также с присутствием гармоник нулевой последовательности. По графику явно прослеживается увеличение нагрузки в дневное время, когда в институте проходят занятия и задействованы все компьютерные классы. В 22-00 компьютерные классы автоматически выключаются, и это выражено резким падением кривых тока на графике.

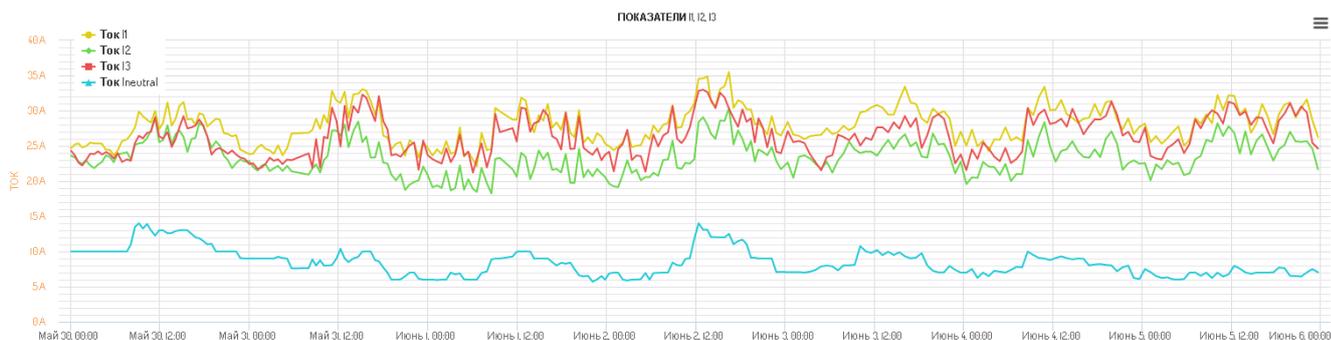


Рисунок 3.1. График фазных токов за неделю

График фазных напряжений сети учебно-лабораторного корпуса представлен на рисунке 3.2. Согласно [19] напряжение сети не должно превышать 10% от номинального напряжения. На основании полученного графика напряжений можно сделать вывод, что перенапряжений в сети учебного корпуса нет. А кратковременное увеличение напряжения обычно связано с изменением нагрузки в фазе.

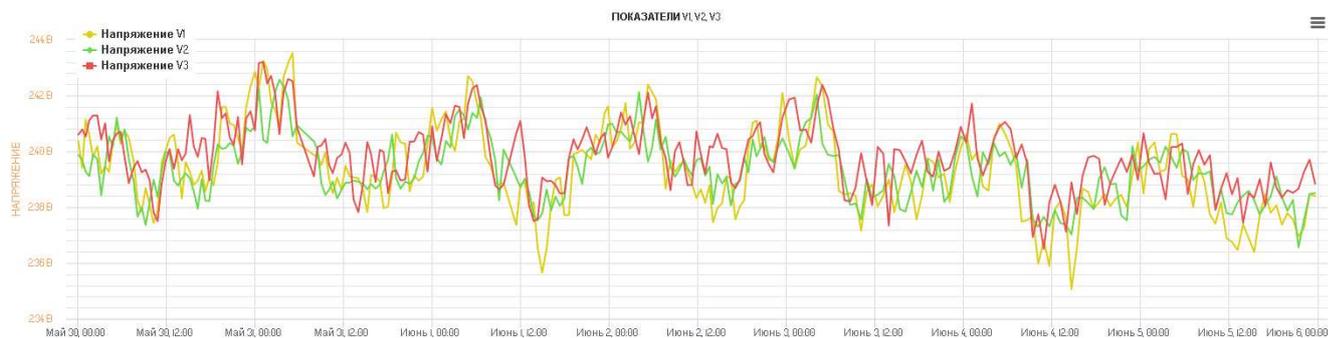


Рисунок 3.2. График фазных напряжений за неделю

На рисунке 3.3 показаны графики значений 3, 5 и 7-й гармонических составляющих тока относительно величины основной гармоники. В спектрах тока доминирующей является 3-я гармоника вне зависимости от дня недели и времени суток. Максимальное значение, которое достигает 3-я гармоническая составляющая приближено к 20% от величины основной гармоники.



Рисунок 3.3. Гармонические составляющие фазных токов: 3, 5 и 7-я гармоники

На рисунке 3.4 изображен график значений 3, 5 и 7-й гармонических составляющих напряжения относительно величины основной частоты. Значения коэффициентов 3, 5 и 7-й гармонической составляющей напряжения не превышают допустимых значений [19].



Рисунок 3.4. Гармонические составляющие фазных напряжений: 3, 5 и 7-я гармоники

Спектральный состав фазных токов при максимальной нагрузке представлен на рисунке 3.5. Наличие в спектре фазных токов нечетных гармоник, из которых 3-я, 5-я, 7-я и 11-я имеют наибольшее значение, связано с тем, что в рассматриваемый период времени в учебном корпусе максимально задействованы все учебные и компьютерные классы, работает освещение и офисное оборудование. Максимальное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока достигает 16%.

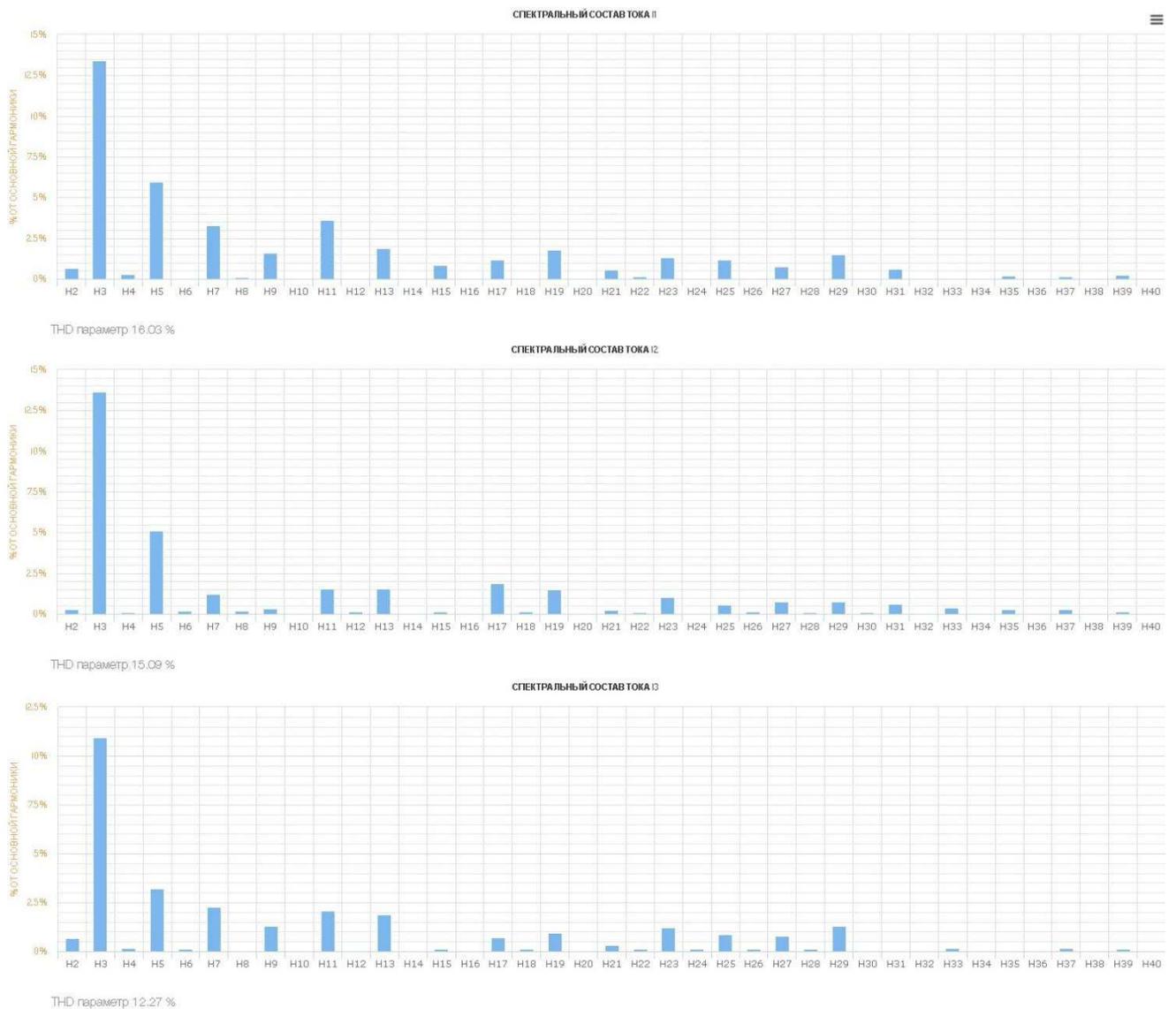


Рисунок 3.5. Спектральный состав фазных токов при максимальной нагрузке

На рисунке 3.6 изображен график спектрального состава фазных напряжений при максимальной нагрузке на сеть. Согласно [19] значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения для сети 0,4 кВ не должно превышать 8%. Максимальный коэффициент гармонических составляющих переменного напряжения в фазе А составляет 3,24%. Коэффициент гармонических составляющих переменного напряжения находятся в пределах нормы.

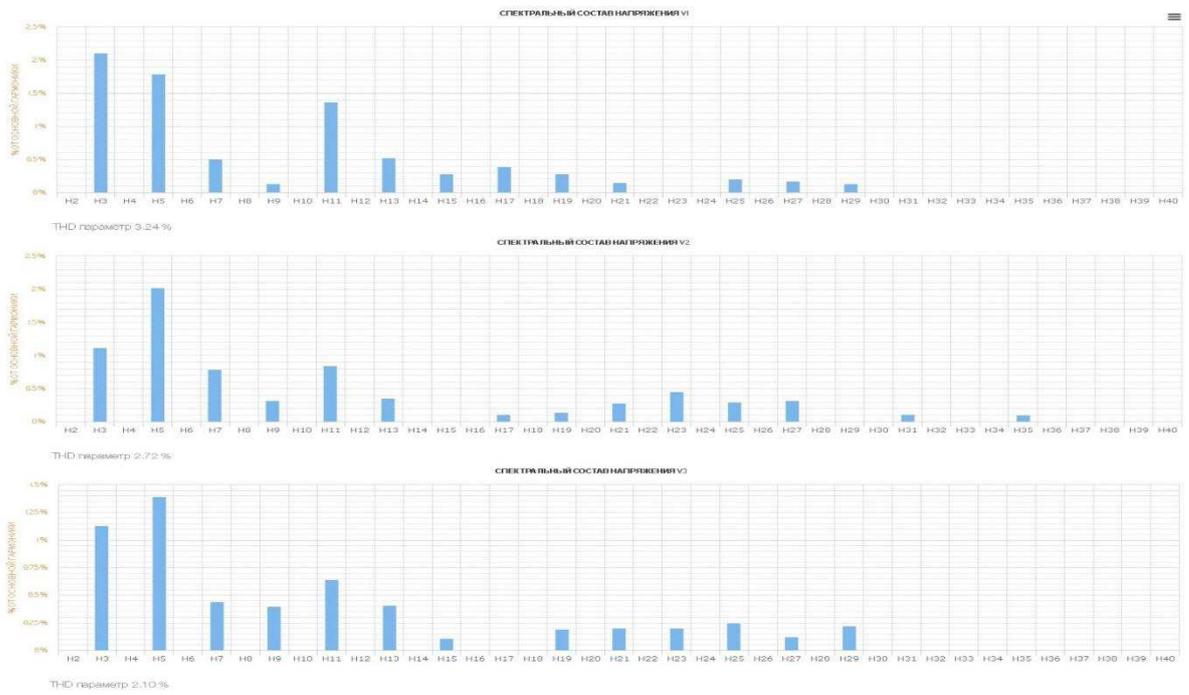
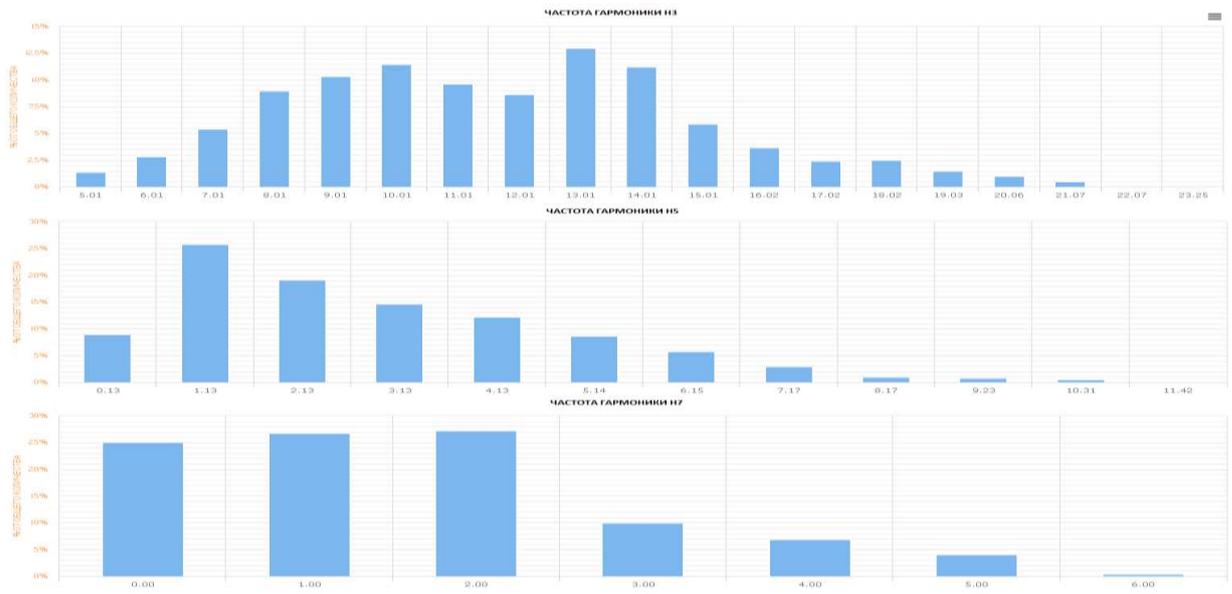


Рисунок 3.6. Спектральный состав фазных напряжений при



максимальной нагрузке

Рисунок 3.7. Частота возникновения 3-й, 5-й и 7-й гармоник в фазе В за неделю

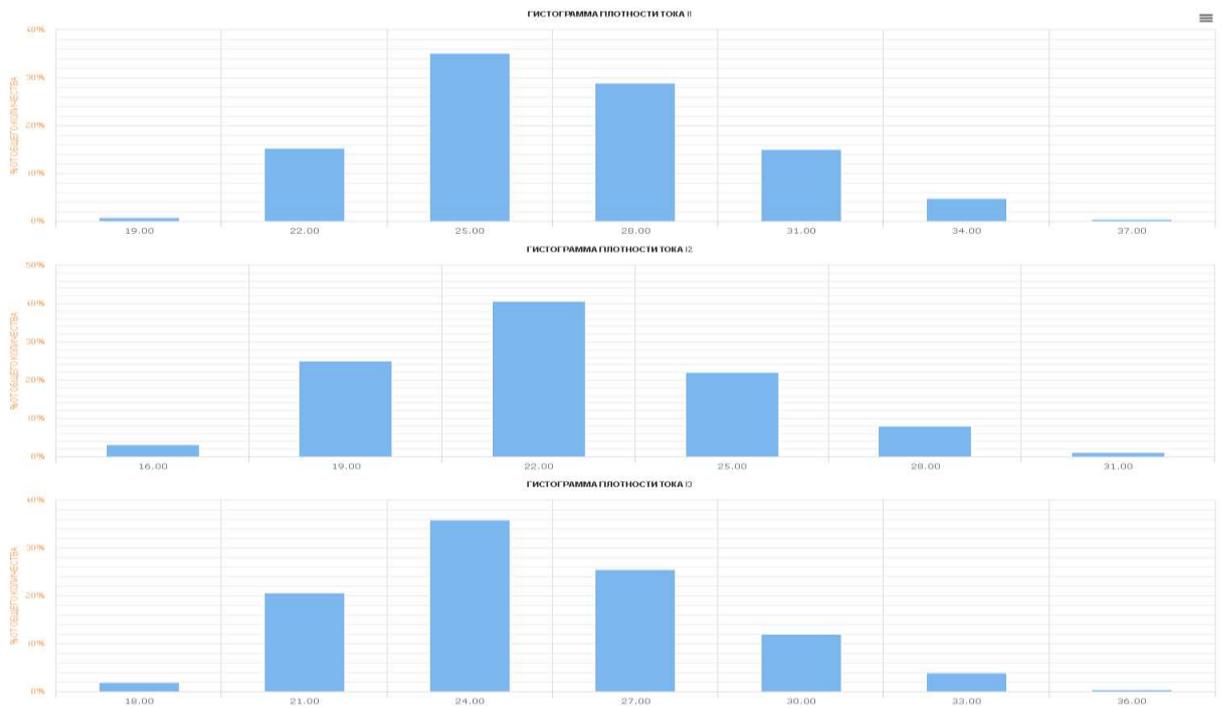


Рисунок 3.8. Гистограмма плотности токов за неделю

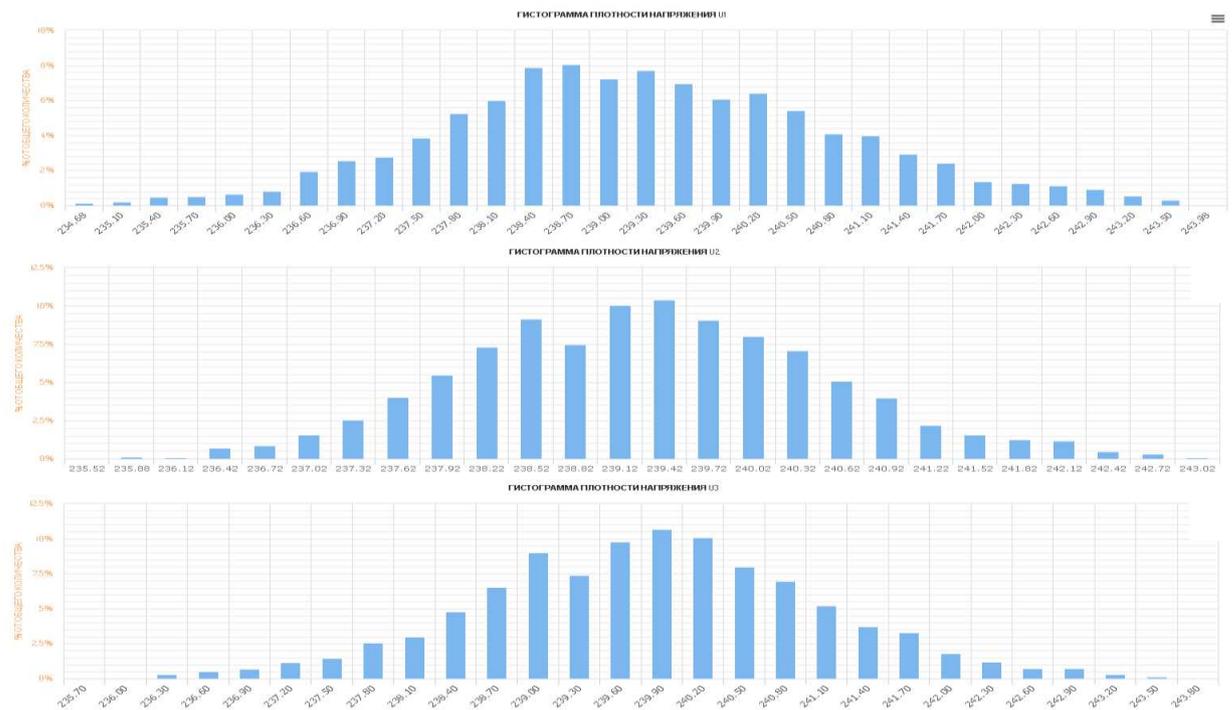


Рисунок 3.9. Гистограмма плотности напряжений за неделю

### 3.2 Офисный центр

Офисный центр расположен в современном здании, построенном в 2004 году.

Питание электропотребителей обеспечивают два трансформатора мощностью 630 кВА каждый. Переключение ввода организовано на распределительной подстанции около здания.

Основная часть нагрузки – однофазная, неравномерно распределенная между фазами. Отсюда ожидается перекос фазного напряжения, повышенный ток в нейтральном проводнике. Службой эксплуатации здания был отмечен преждевременный износ нейтрального проводника, повреждение соединительных контактов, в случаях большой нагрузки – высокий нагрев нейтрального проводника.

В здании реализована система приточно-вытяжной вентиляции, во всех офисных помещениях установлены сплит-системы кондиционирования, большое количество компьютеров и офисного оборудования. В здании и на парковке установлено светодиодное и люминесцентное освещение.

Для наблюдения за показателями качества электрической энергии в 6-этажном офисном здании были установлены приборы на присоединениях 0,4 кВ – на вводе здания и на группу потребителей 3 этажа.

Режим работы офисного здания с 07:00 до 22:00, однако арендаторы придерживаются распространенного графика – с 08:00 до 18:00. Отсюда исходят перепады потребления электроэнергии, с резким скачком в начале рабочего дня ~8:30 часов и резким спадом по окончании работы ~18:00.

При увеличении потребляемой мощности нагрузки наблюдается просадка напряжения. Современное оборудование электрической подстанции и электрическая проводка распределительной сети, выполненная в

соответствии с действующими нормами, в совокупности обеспечивают изменение напряжения в пределах 10%, что не превышает установленные параметры качества электрической энергии [19]. За время наблюдения значительных перенапряжений или про падков напряжения зафиксировано не было.

В рабочее время постоянно включены следующие потребители: персональные компьютеры, мониторы, оргтехника, рабочее освещение, вентиляция. Периодически происходит включение нагревательных приборов, кондиционеров (в жаркое время года).

По завершению рабочего дня часть оборудования переходит в режим ожидания снижая потребление электроэнергии, но системные блоки остаются работать постоянно. В темное время суток работает дежурное освещение.

### 3.2.1 Показания с прибора, установленного на ввод в здание офисного центра

График изменения нагрузки на вводе в здание, представлен на рисунке 3.10. На графике видна характерная несимметричность распределения нагрузок по разным фазам. Нагрузка по фазе А в среднем на 30% превышает нагрузку по остальным фазам. Ток в нейтральном проводнике превышает значения фазных токов в два раза.

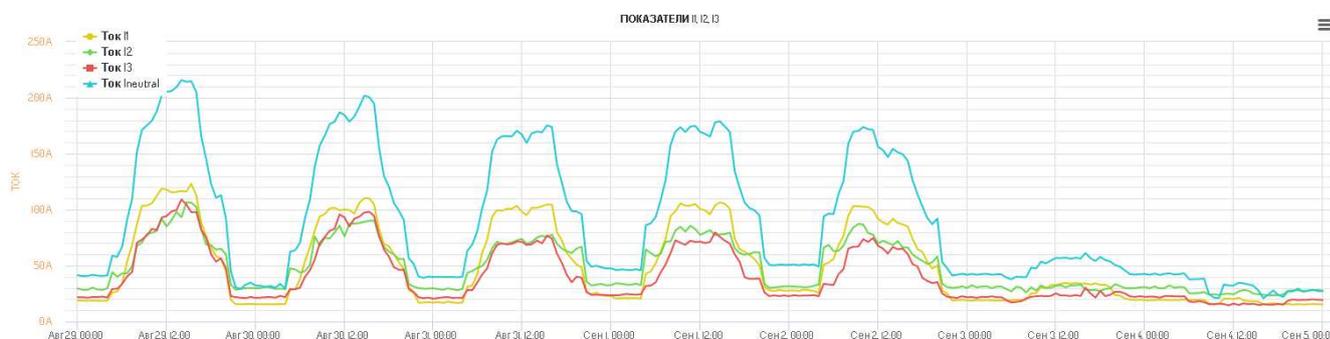


Рисунок 3.10. График фазных токов за неделю

На рисунке 3.11 представлен график фазных напряжений. Наблюдается просадка напряжения при увеличении мощности нагрузки. Присутствует несимметрия напряжений. Перенапряжений и провалов напряжения за период наблюдения зафиксировано не было.

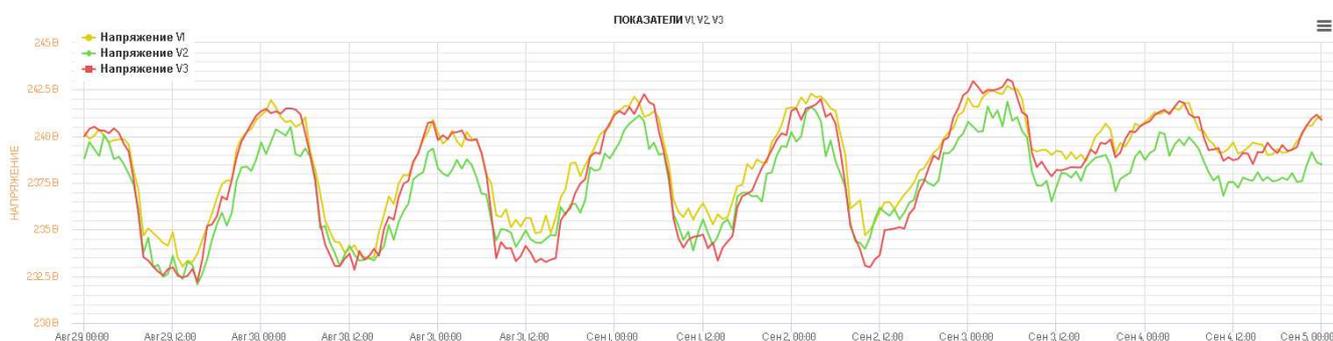


Рис 3.11. График фазных напряжений за неделю

Рисунок 3.12 отражает уровень гармоник фазных токов. Отмечается значительный уровень 3-й гармоники (порядка 30% по фазе В), повышенные значения 5 и 7 гармоник.



Рисунок 3.12. Гармонические составляющие фазных токов: 3, 5 и 7-я гармоники

На рисунке 3.13 показаны гармонические составляющие фазных напряжений. Значения коэффициентов 3, 5 и 7-й гармонической находятся в пределах допустимых значений [19]. Три прямых участка в левой части рисунка связаны с разрывом целостности регистрации показаний (ошибка



прибора при регистрации событий).

Рисунок 3.13. Гармонические составляющие фазных напряжений: 3, 5 и 7-я гармоники



Рисунок 3.14. Спектральный состав фазных токов при максимальной нагрузке на сеть

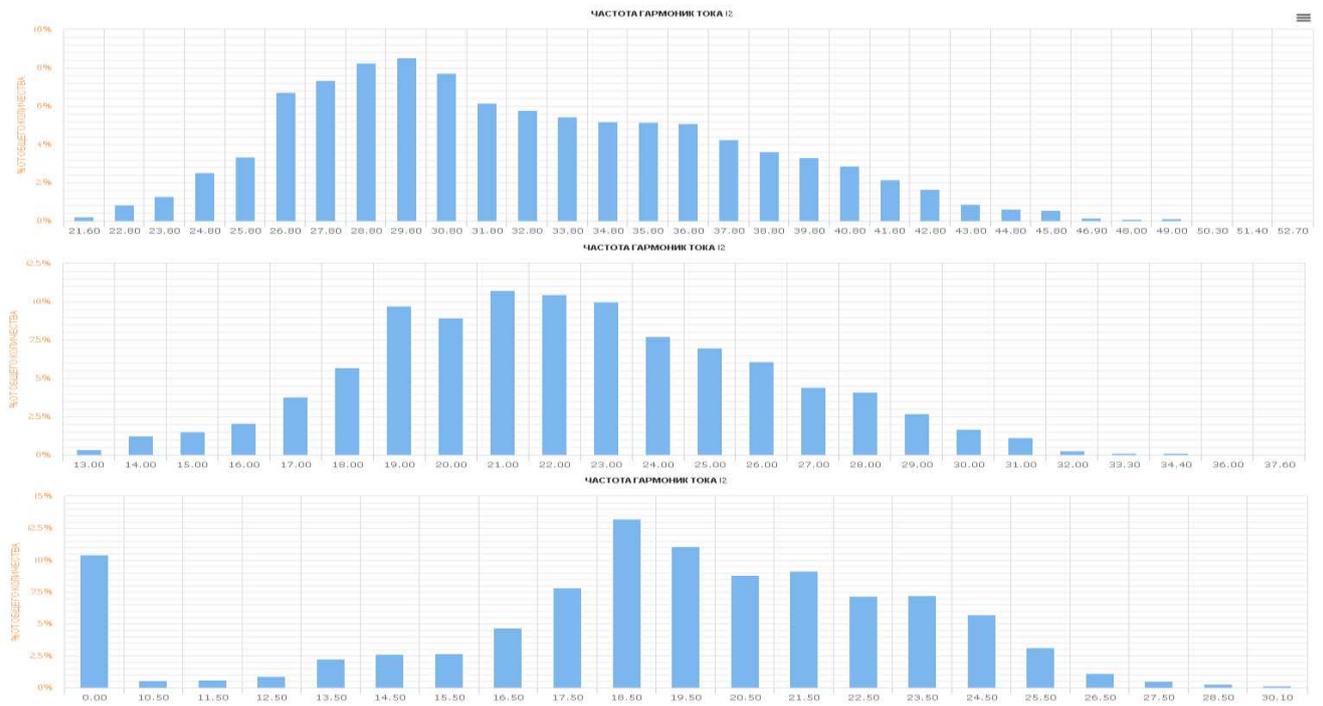


Рисунок 3.15. Частота 3, 5, 7-й гармоник (фаза В) за неделю

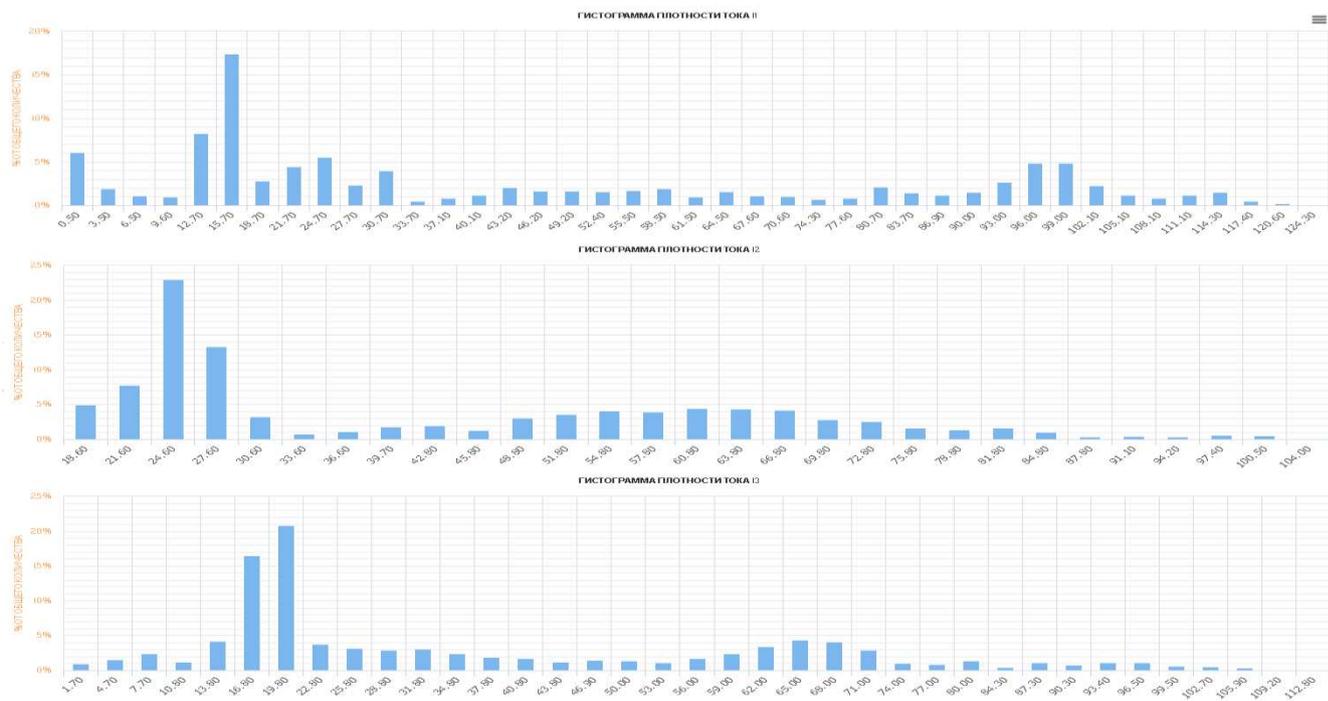


Рисунок 3.16. Гистограмма плотности токов за неделю



Рисунок 3.17. Гистограмма плотности напряжений за неделю

### 3.2.2 Показания с прибора, установленного на группу потребителей 3 этажа офисного здания

График изменения нагрузки на вводе в здание, представлен на рисунке 3.18. На графике видна характерная несимметричность распределения нагрузок по разным фазам. Нагрузка по фазе А в среднем на 50% превышает нагрузку по остальным фазам. Ток в нейтральном проводнике превышает значения максимальные значения фазных токов на 25-50%.

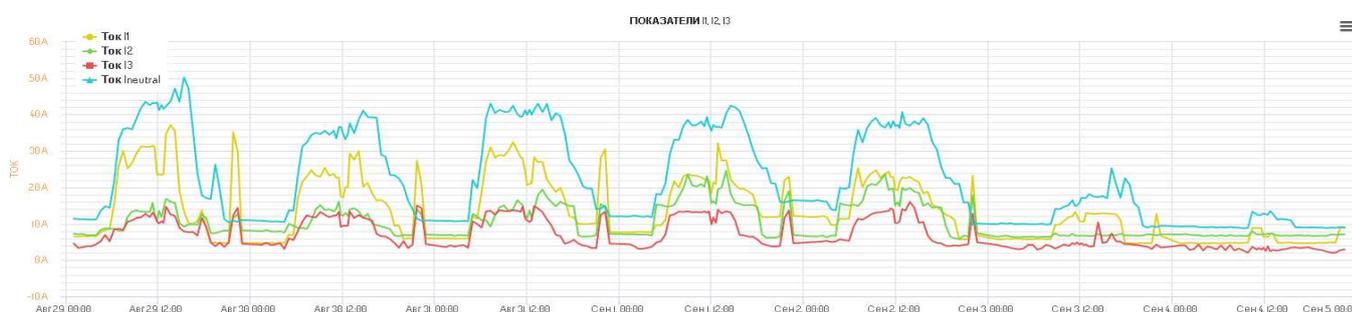


Рисунок 3.18. График фазных токов за неделю

На рисунке 3.19 представлен график фазных напряжений. Наблюдается просадка напряжения при увеличении мощности нагрузки. Особенно заметны острые пики при резком скачке нагрузок в вечернее время (выполнялись сервисные процедуры системы вентиляции). Присутствует несимметрия напряжений. Перенапряжений и провалов напряжения за период наблюдения зафиксировано не было. Параметры не покидают пределов допустимых значений [19].

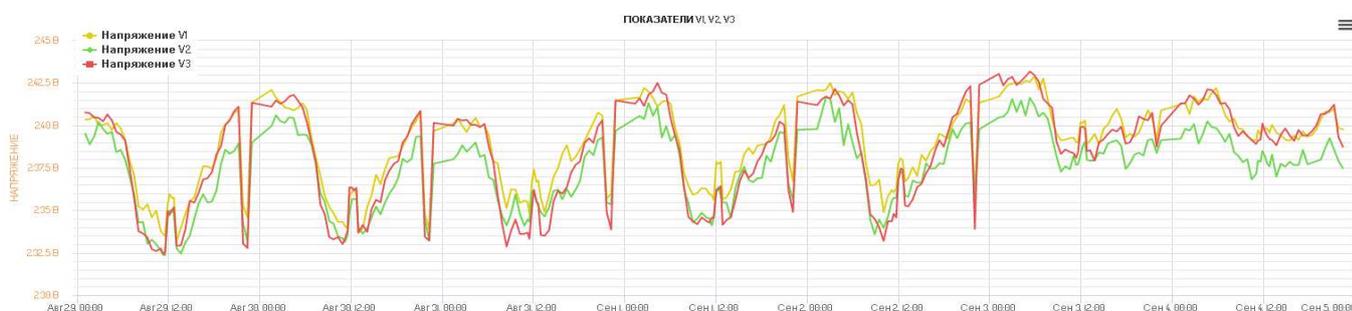


Рисунок 3.19. График фазных напряжений за неделю

На рисунке 3.20 представлен график, отражающий уровень гармоник фазных токов. Высокий уровень гармонических составляющих, местами достигающий до 50%, лежит далеко за предельно допустимыми значениями [19].



Рисунок 3.20. Гармонические составляющие фазных токов: 3, 5 и 7-я гармоники

На рисунке 3.21 показаны гармонические составляющие фазных напряжений. Значения коэффициентов 3, 5 и 7-й гармонической находятся в пределах допустимых значений [19]. Прямой участок 7 гармоника в левой части рисунка связан с разрывом целостности регистрации показаний (ошибка прибора при регистрации событий).



Рисунок 3.21. Гармонические составляющие фазных напряжений: 3, 5 и 7-я гармоники

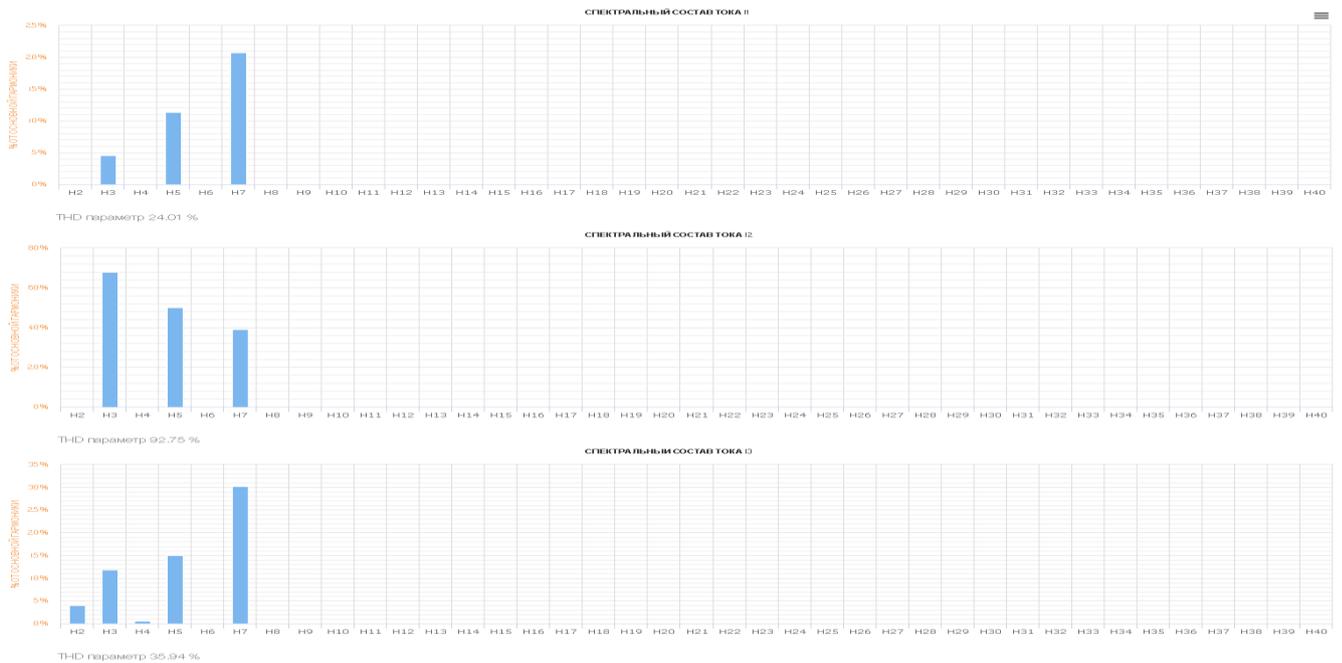


Рисунок 3.22. Спектральный состав фазных токов при максимальной нагрузке на сеть

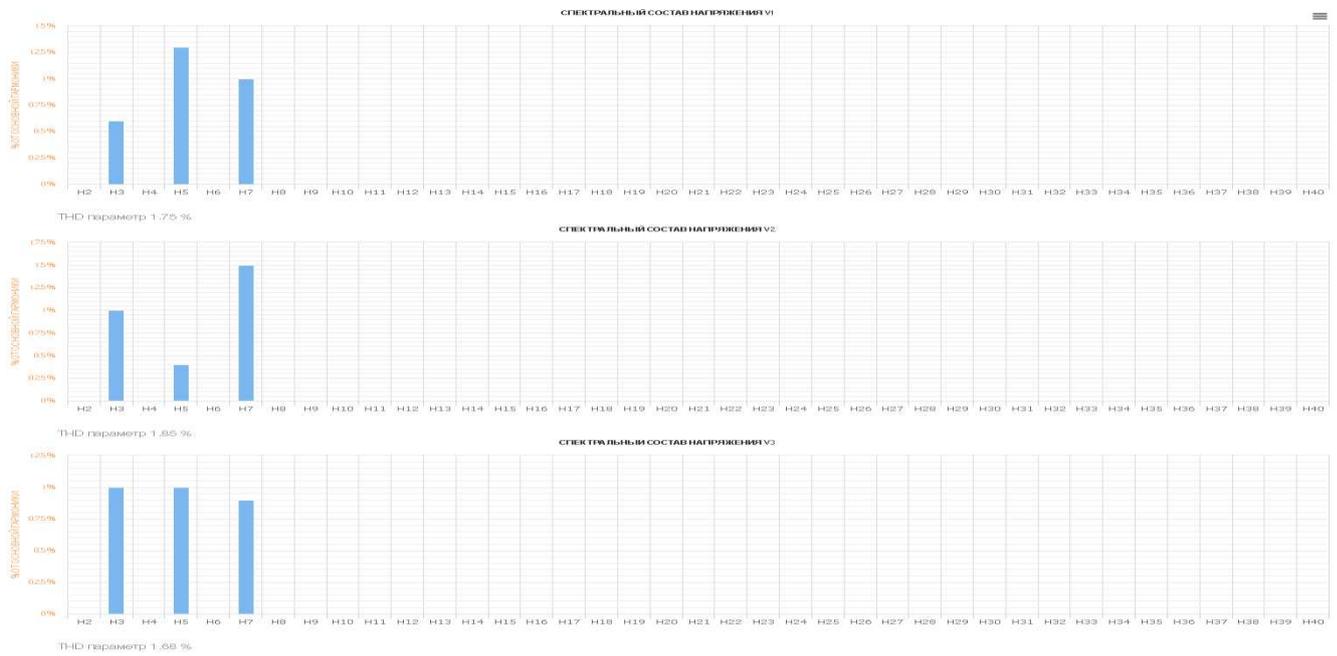


Рисунок 3.23. Спектральный состав фазных напряжений при максимальной нагрузке на сеть

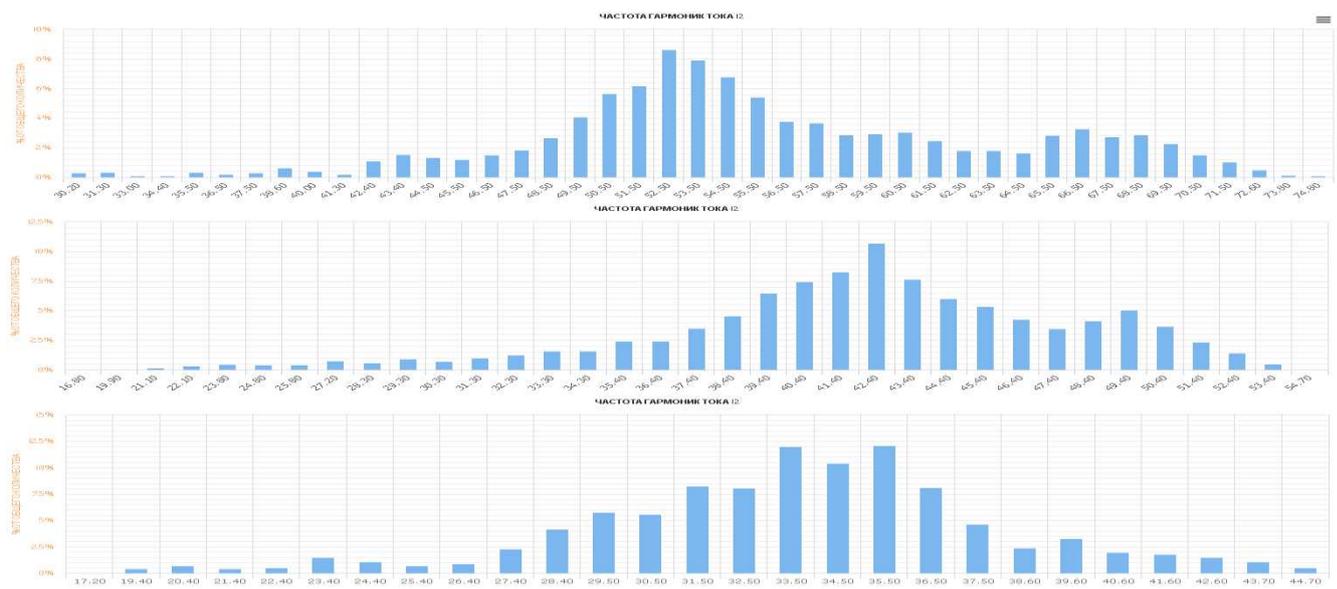


Рисунок 3.24. Частота гармоник 3-й, 5-й и 7-й в фазе А за неделю

Фазны ток			
	МАКС	МІН	СР.ЗН
U1	49.60	3.00	13.27
U2	23.10	4.30	8.28
U3	19.80	1.00	6.89

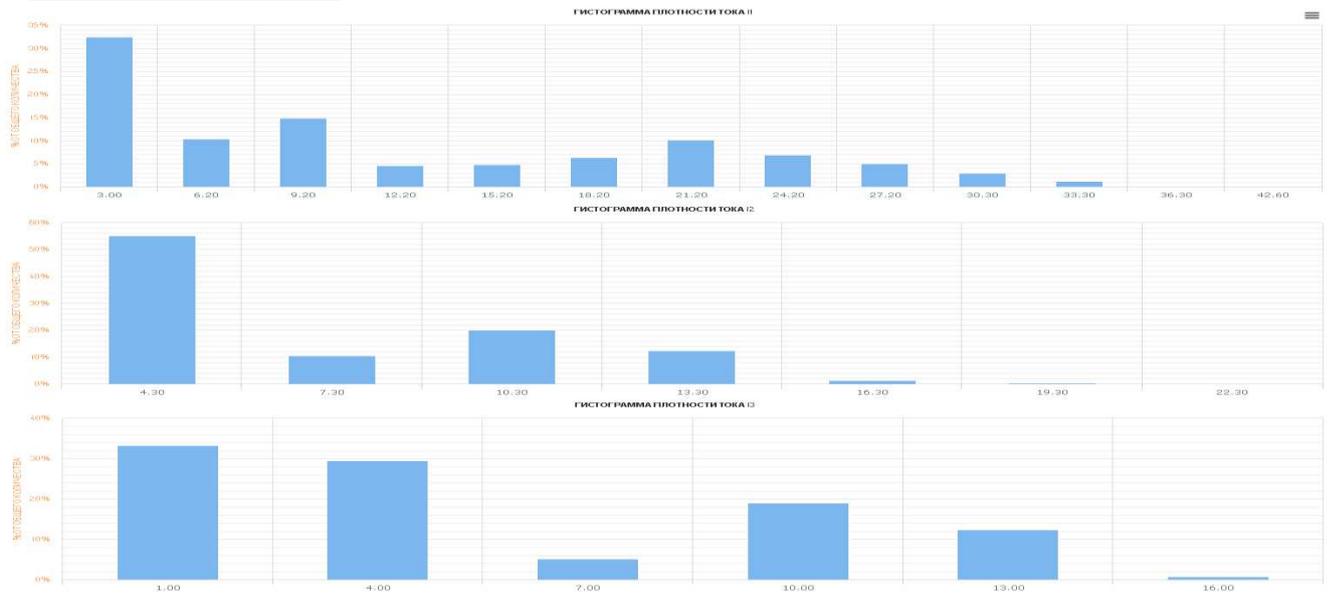


Рисунок 3.25. Гистограмма плотности токов за неделю

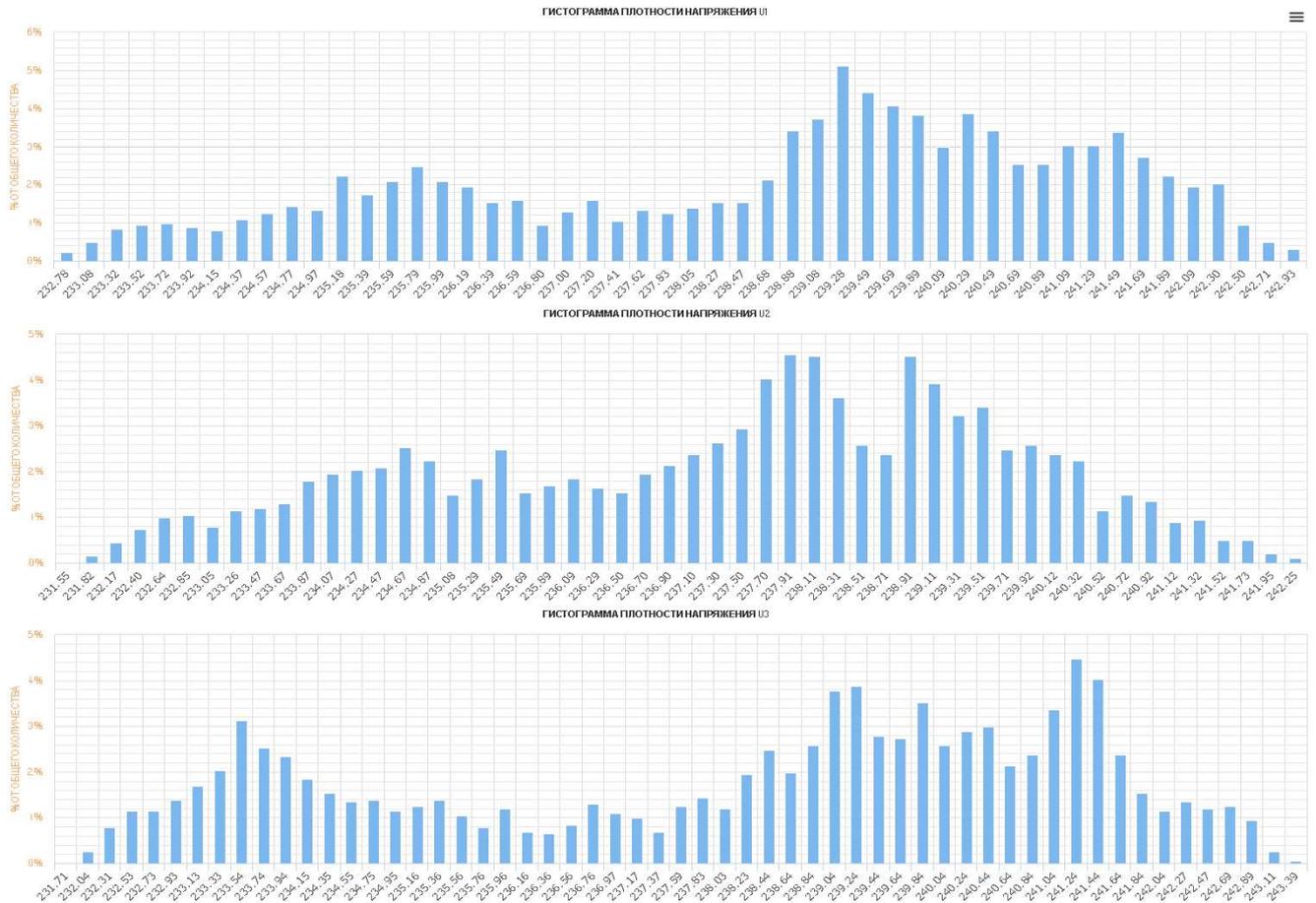


Рисунок 3.26. Гистограмма плотности напряжений за неделю

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований решена актуальная проблема разработки информационно-измерительной системы для мониторинга качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ.

В процессе исследования получены следующие результаты:

- проведен сравнительный анализ архитектур распределенных информационно-измерительных систем (ИИС);
- проведен анализ специализированных форматов данных;
- разработана архитектура и сформирована распределенная ИИС контроля качества электрической энергии;
- проведен анализ качества электрической энергии в учебных зданиях СФУ, а также в офисном центре;
- разработана 1 очередь лабораторного практикума с удаленным доступом.

Результаты проведенных исследований показывают, что проблема обеспечения качества электроэнергии весьма актуальна для распределительных сетей крупных городов. Это подтверждают и исследования других авторов [3, 11, 12]. В сетях крупных коммерческих и офисных потребителей наблюдаются значительные искажения формы кривых токов. В ряде случаев коэффициент гармонических составляющих тока превышает 30%. Измерения проводились на кабельных вводах и в некоторых случаях, на отдельных присоединениях. Коэффициент искажения синусоидальной формы кривой токов может превышать 100% [7, 8]. В этом случае потери электроэнергии во внутренних сетях зданий увеличиваются в 2 – 2.5 раза по сравнению с синусоидальным режимом.

Серьезную проблему представляют токи третьей гармоники, суммирующиеся в нейтральных проводниках. Это приводит к увеличению потерь и в ряде случаев – к авариям, вызванным перегоранием нейтрального

провода. Кроме того, большие уровни токов третьей гармоники вызывают дополнительный нагрев обмоток трансформаторов и могут вызвать повреждение их изоляции.

Российский стандарт [19] устанавливает допустимые значения коэффициента гармонических составляющих напряжения. Однако допустимые значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока не нормирует [19].

Для того чтобы оценить, насколько велик уровень искажения токов, обратимся к международным стандартам. В электротехнической практике часто используются стандарты [34, 35]. Эти стандарты определяют максимальные значения токов нечетных гармоник в процентах от тока нагрузки. В соответствии со стандартом [33], максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока зависит от отношения тока короткого замыкания сети в точке общего присоединения к току нагрузки. В случае мощной сети ( $100 < I_{sc} / I_L < 1000$ ) максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока не должно превышать 15%. Токи гармоник с порядковыми номерами  $n < 11$  должны быть меньше 12% от тока нагрузки  $I_L$ . Результаты проведенных измерений показывают, что в большинстве случаев суммарного коэффициента, гармонических составляющих тока [21] превышает допустимые значения, определяемые международными стандартами.

Электрические сети офисных зданий, построенных в 60 – 90 годы, рассчитаны на относительно небольшие нагрузки. Широкое использование современного офисного оборудования может привести к их перегрузке. Замена кабелей в таких зданиях может потребовать значительных капитальных затрат. Следует учитывать и режим использования офисного оборудования. Как правило, персональные компьютеры включены в течение всего рабочего дня, а часть устройств (например, серверы) работает круглосуточно.

Очевидно, что широкое использование энергосберегающих устройств, имеющих нелинейные характеристики, может приводить к увеличению гармонических искажений токов и напряжений. Поэтому мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности должны предусматривать меры, направленные на поддержание качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БД	База данных
ИИС	Информационно-измерительная система
КЭ	Качество электроэнергии
ПК	Пункт контроля
ПКЭ	Показатели качества электроэнергии
ПКЭ	Прибор контроля показателей качества электроэнергии
СААУП	Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования
СОЕВ	Система обеспечения единого времени
СУБД	Система управления базой данных
СФУ	Сибирский Федеральный Университет
ЦП	Центр питания
ЭЭ	Электрическая энергия
COMTRADE	Common Format for Transient Data Exchange for Power System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NTP	Network Time Protocol
PQDIF	Power Quality Data Interchange Format

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер; пер. с англ. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
- 2 Атабеков, Г. И. Основы теории цепей: учебник. 2-е изд. / Г. И. Атабеков. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2006. – 432 с.
- 3 Боярская, Н. П. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Я. А. Кунгс; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 138 с.
- 4 Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, А. А. Севостьянов. – Нижний Новгород: НГТУ, 2004. – 214 с.
- 5 Вагин, Г. Я. К вопросу о выборе нулевых проводников в городских электрических сетях. / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов, Е. Б. Солнцев, П. В. Терентьев. // Промышленная энергетика. – 2014. – № 2. – с. 22-25.
- 6 Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике./ А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Р. К. Борисов [и др.] ; под редакцией А. Ф. Дьякова. – Москва: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
- 7 Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд. / И. В. Жежеленко. – Москва: Энергоатомиздат, 1994.
- 8 Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- 9 Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон; пер. с англ. – Москва: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.

- 10 Марпл.-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл.-мл.; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. - 584 с., ил.
- 11 Темербаев, С. А. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. / С. А. Темербаев, Н. П. Боярская, В. П. Довгун. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии. 2013, № 1, с. 107-120.
- 12 Тульский, В. Н. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В. / В. Н. Тульский, И. И. Карташев [и др.] // Промышленная энергетика, № 5, 2013, с. 39-44.
- 13 Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р.Г. Шамонов [и др.]; под ред. Ю. В. Шарова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
- 14 Шидловский, А. К., Жаркин А. Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев, «Наукова думка», 2006, 210 с.
- 15 ГОСТ Р 51318.14.1-2006 (СИСПР 14-1:2005) Совместимость технических средств электромагнитная. Бытовые приборы, электрические инструменты и аналогичные устройства. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений. – Введ. 2007 – Москва : Стандартиформ, 2007. – 90 с.
- 16 ГОСТ 23875-88 Качество электрической энергии. Термины и определения. – Введ. 1989 – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2005. – 16 с.
- 17 ГОСТ 30804.4.7-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – Введ. 2014 – Москва : Стандартиформ, 2014. – 41 с.
- 18 ГОСТ 30804.4.30-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей

качества электрической энергии. – Введ. 2014 – Москва : Стандартиформ, 2014. – 68 с.

19 ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014 – Москва : Стандартиформ, 2014. – 19 с.

20 ГОСТ 33073-2014 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2015 – Москва : Стандартиформ, 2015. – 52 с.

21 ГОСТ 30804.3.2-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – Введ. 2013 – Москва : Стандартиформ, 2014. – 43 с.

22 РД 153-34.0-15.501-00 Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии. – Введ. 2001 – Москва : Научный центр ЛИНВИТ, 2001. – 44 с.

23 РД 153-34.0-15.502-2002 Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. – Введ. 2002 – Москва : Научный центр ЛИНВИТ, 2002. – 32 с.

24 СТО 4.2 07 2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Взамен СТО 4.2 07 2012; дата введ. 30.12.2013. – Красноярск, 2013. – 60с.

25 Akagi, H. Active harmonic filters / H. Akagi. // Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12, pp. 2128-2141.

- 26 Bagheri, P., A Distributed Filtering Scheme to Mitigate Harmonics in Residential Distribution Systems / P. Bagheri, W. Xu, T. Ding. // IEEE transactions on Power Delivery, vol. 31, No. 2, 2016, pp. 648 – 656.
- 27 Davis, E. J. Harmonic pollution metering: theoretical considerations / E. J. Davis, A. E. Emanuel, D. J. Pileggi. // IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 1, pp. 19-23, Jan. 2000.
- 28 De Lima Tostes, M. Impacts over distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers. / M. De Lima Tostes, U. Bezerra, R. Silva. // IEEE transactions on power delivery, vol. 20, No. 1, 2005, pp. 384 – 389.
- 29 Dugan, R. Electrical power systems quality / R. Dugan, M. McGranaghan. // McGraw-Hill, 2002.
- 30 Gruz, T. A survey of neutral currents in three-phase computer power systems. / T. A Gruz. // IEEE trans. on industry applications. 1990, Vol. IA-26, No. 4, pp. 719-725.
- 31 Hu, C-H. Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in northern Taiwan / C-H. Hu, C-J. Wu, Y-W. Chen. // IEEE trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, 1997, pp. 1275-1281.
- 32 IEEE Std. 1459-2010. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions.
- 33 IEEE Std. P 1159.3. Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data. – 2003.
- 34 IEEE Std. 519-1992. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – 2014.
- 35 EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. – 2015.
- 36 Karimi, H. An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions / H. Karimi, M. Karimi-Ghartemani, M. Iravani // IEEE transactions on power delivery, Vol. 18, No. 4, 2003, pp. 1350-1355.

- 37 Khadkikar, V. Enhancing power quality using UPQC: a comprehensive overview. / V. Khadkikar // IEEE transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 5, 2012, pp. 2284- 2297.
- 38 Key, T. Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems / T. Key, J-S. Lai // IEEE trans. on Power Systems., Vol. 13, 1998, No. 3, pp. 890-897.
- 39 Koval, D. Power quality characteristics of computer loads / D. Koval, , C. Carter. // IEEE trans. on industry applications, Vol. 33, No. 3, 1997, pp. 613-621.
- 40 Lai, J.-S. Effectiveness of harmonic mitigation equipment for commercial office buildings / J.-S. Lai, T. Key. // IEEE trans. on Industry Applications, 1997, Vol. 33, No. 4, pp. 1104-1110.
- 41 Liew, A-C. Excessive neutral currents in three-phase fluorescent lighting circuits. / A-C. Liew. // IEEE trans. on Industry applications. 1989, Vol. IA-25, No. 4, pp. 776-782.
- 42 McBee, K. D Evaluating the Long-Term Impact of a Continuously Increasing Harmonic Demand on Feeder-Level Voltage Distortion / K. D. McBee, M. G. Simões. // IEEE trans. on Industry Applications, 2014, Vol. 50, No. 3, pp. 2142-2149.
- 43 Piel, J. Experimental Measurements of Energy Consumption Changes in a Wye Distribution System Serving Multiple Computer Loads as Various Harmonic Solutions are Applied. / J. Piel, M. Lowenstein. // Proceedings of IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQPS). September 12-15 2004, pp. 294-298.
- 44 Pomilio, J. Characterization and compensation of harmonics and reactive power of residential and commercial loads. / J. Pomilio, S. Deckmann. // IEEE transactions on Power Delivery, vol. 22, No. 2, 2007, pp. 1049-1055.
- 45 Rodrigues, P. Current harmonic cancellation in three-phase four-wire systems by using a four-branch star filtering topology. / P. Rodrigues, I. Candela, A. Luna, [etc] // IEEE trans. on Power Electronics, Vol. 24, No. 8, 2009, pp. 1939-1950.

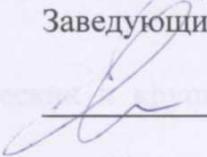
46 Watson, N. Implication for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. / N. Watson, T. Scott, J. Hirsch. // IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1521-15281.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Системы автоматики, автоматизированного управления и проектирования

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

 С. В. Ченцов

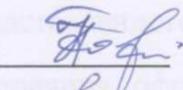
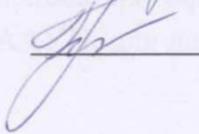
« 17 » июня 2017 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ  
МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 0,4 кВ**

27.04.04 Управление в технических системах

27.04.04.03 Автоматизация управления технологическими процессами в  
энергетике

Научный руководитель		<u>17</u> .06.2017	профессор, д-р. техн. наук В. П. Довгун
Выпускник		<u>17</u> .06.2017	Е. С. Звягинцев
Рецензент		<u>17</u> .06.2017	доцент, канд. техн. наук Н. П. Боярская
Нормоконтролер		<u>17</u> .06.2017	Т. А. Грудинова

Красноярск 2017