

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА**

На правах рукописи

УДК.: 621.3.017:004.383.4(043.3)

Бузурманкулова Чолпон Мейманалыевна

**Исследование влияния качества электрической энергии на потери в
элементах промышленных сетей с использованием компьютерного
моделирования**

Специальность 05.14.02 – электростанции и электроэнергетические
системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Сатаркулов Калмурза

Бишкек -2025

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. АНАЛИЗ ПРИЧИН УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСЛЕДСТВИЯ УХУДШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	12
1.1 Введение	12
1.2 Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии.....	12
1.3 Задачи контроля качества электроэнергии и инструментальные средства их исследования в системах электроснабжения.....	30
Выводы по главе 1.....	32
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. КОМПЬЮТЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРОМПРЕДПРИЯТИЙ.....	34
2.1 Методы расчета потерь электроэнергии.....	34
2.2 Разработка виртуального прибора для исследования теплового режима работы и потерь мощности в токоведущих элементах сети.....	39
2.2.1 Структурные подсистемы виртуального прибора.....	41
2.2.2 Разработка виртуального прибора и его подсистем в программной среде LabVIEW	44
2.2.3 Разработка ВПП – 2 для численного решения ДУ и определения расчетного тока группы ЭП определяющие потери мощности в сети.....	51
2.3 Расширение функциональной возможности виртуального прибора.....	64
Выводы по главе 2.....	66
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ СЕТИ С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMPOWERSYSTEMS/SIMULINK И LABVIEW.....	67

3.1. Влияния нелинейных элементов сети на качество электроэнергии и оценка его последствия с использованием пакета программ MatLab/SimPowerSystems/Simulink.....	68
3.1.1. Модель нелинейного резистора.....	70
3.1.2. Математическая модель индуктивности с нелинейной характеристикой.....	74
3.2.Обоснование формулы расчета плотности тока по сечению проводника и активного его сопротивления на основе уравнения Максвелла	79
3.3.Аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник для совместного их графического представления.....	84
3.4. Виртуальный прибор в среде LabVIEW для анализа взаимодействий гармонических и интергармонических колебаний	89
Выводы по главе 3.....	95
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВО ВНЕШНЕЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЕЕ КОНТРОЛЯ.....	97
4.1. Способ оценки потерь во внешней сети предприятия	100
4.2. Разработка инструментария в виде виртуального прибора для автоматизации определения коэффициента активных потерь в системе внешнего электроснабжения потребителя.....	105
4.3. Сравнительный анализ результатов расчета и моделирования нагрузочной потери по существующему методу расчета и методу компьютерного моделирования	113
Выводы по главе 4.....	121
Заключение.....	123
Список использованной литературы.....	126
Приложения 1.....	140
Приложения 2.....	164

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭЭ – электроэнергия;	SPS – SimPowerSystems;
АСНИ - автоматизированная система научных исследований;	ИТ - источники тока;
КЭ - качество электрической энергии;	БНР - блока нелинейного резистора;
РЭН - расчетные электрические нагрузки;	ВЭ – вычислительные эксперименты;
ПКЭ - показателей качества электроэнергии;	ВАХ – Вольт-Амперная характеристика;
ИГ – интергармоники;	НИ – нелинейный индуктивность;
МЭК - международная электротехническая комиссия;	НЭ - нелинейные элементы;
ККЭ - контроль качества электроэнергии;	ЭДС – электродвижущая сила;
ЭЭС – электроэнергетическая система;	ВЛ - воздушные линии;
СИ - средства измерений;	КМ - компьютерные модели;
ВП - виртуальные приборы;	ДП - дополнительных потерь;
ВПП - виртуальные подприборы;	ЛАТР - лабораторная автотрансформатор;
ЭУ - экспериментальная установка	АМФР - асинхронные машины с фазным ротором;
ПЭ - потери ЭЭ;	ПК - персональный компьютер;
ИМ- имитационные модели;	АТДТ - автотрансформаторный датчик тока;
АВМ - аналоговые вычислительные машины;	ЛУ - лабораторная установка;
ЭП – электроприемники;	ИП - измерительный прибор;
АЦП - аналого-цифровой преобразователь;	ФМЭ - физические модели элемента;
СДМ - светодиодный модуль;	ФМ - функциональные модули;
	ЭВМ - электронная вычислительная машина.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Вопросы обеспечения качества электроэнергии (КЭ) систематически возникают в электроэнергетических системах (ЭЭС) разных стран мира. Связано это с увеличением доли электроприемников (ЭП) с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) (далее «нелинейная нагрузка») в ЭЭС, которые приводят к возникновению гармонических и интергармонических составляющих в составе тока нагрузки и к **увеличению потерь электроэнергии в сетях**. Кроме того, следует отметить, что в реальных случаях эксплуатации промышленных предприятий довольно часто коэффициенты гармонических составляющих напряжения превышают нормативные значения. Тогда как токоведущие части ЭП и электрооборудований (ЭО) промышленных предприятий чувствительны к изменению формы кривой питающего напряжения, так они являются причиной возникновения несинусоидальных токов в ЭП.

В связи с этим несомненной актуальностью обладает исследование, посвященное оценке влияния несинусоидальности формы кривой тока и напряжения на функционирование ЭП и ЭО. Подтверждением актуальности исследований являются ежегодные расходы значительных средств для обеспечения КЭ в ЭЭС разных стран.

Ухудшение показателей, характеризующих форму кривой напряжения, по отношению к нормативным значениям приводит к дополнительному нагреву токоведущих частей ЭП и ЭО.

Важнейшими количественными показателями технического состояния электрических сетей и уровня их эксплуатации являются величина потерь электроэнергии и тенденция её изменения. Успешное решение задачи поддержания их на минимальном уровне – залог повышения энергоэффективности электрических сетей. Поэтому проблемы исследования и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях на основе научных изысканий, направленных на разработку методов исследования процессов в

распределительных сетях с целью поиска путей снижения потерь ЭЭ в элементах распределительной сети, дополнительно подтверждает актуальность темы.

Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями. Данная работа связана с научной работой Института энергетики и связи при КГТУ им. И. Раззакова и научно - исследовательскими работами по грантам Министерства образования и науки Кыргызской Республики на тему «Методика по расчету нормативных требований в степени компенсации реактивной мощности на границе собственных электрических сетей ОАО «НЭСК» и пользователей»

Цель и задачи исследования. Разработка инструментария для моделирования и исследования, тока нелинейной нагрузки с гармоническими и интергармоническими составляющими, с целью оценки добавочных потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети.

Для достижения цели исследования в диссертационной работе необходимо решить *следующие задачи:*

1. Анализ причин, ухудшения качества электроэнергии в различных режимах работы ЭП;
2. Анализ методов моделирования, программных средств, используемых для достижения поставленной цели;
3. Разработка компьютерных моделей исследуемой промышленной сети в среде Simulink/SimPowerSystems, предназначенных для исследования влияния различных факторов на дополнительные потери мощности и электроэнергии в проводящих элементах промышленных сетей, а также для установления коррелированности между характером вольтамперной характеристикой нелинейных элементов и возможностью появления интергармоник;
4. Анализ характера взаимодействия между основной гармоникой и интергармоническими составляющими в токопроводящих элементах

промышленной сети с помощью инструментария в виде виртуального прибора в среде LabVIEW;

5. Разработка виртуального прибора для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия.

Научная новизна работы:

1. На базе программного комплекса Matlab/Simulink/SimPowerSystems разработана структурная схема в среде Simulink и имитационная модель (ИМ) исследуемой промышленной сети в среде SimPowerSystems. ИМ позволяет воспроизвести работу электротехнических устройств во временной области, а также выполнять различные виды их анализа по определению добавочных потерь электроэнергии в исследуемой сети от гармонических и интергармонических составляющих в нагрузочном токе.

2. Разработанные компьютерные модели нелинейных элементов (НЭ) позволило исследовать, влияние вида характеристик НЭ на спектральный состав сгенерированных ими высших гармоник включая и интергармоники.

3. Предложено аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник. Результат аналитического описания показал, что, на амплитуду одной интергармоники накладываются синусоидальные колебания усреднённой частотой модулированной амплитудой смещения, что дает значительное увеличение общей амплитуды. Этим результатом можно обосновать одно из возможных причин увеличение потерь в проводнике за счет возникновения дополнительных потерь мощности.

4. На базе графической среды программирования LabVIEW, ориентированной на решение задач из области АСНИ, разработан инструментарий в виде ВП для моделирования мгновенных значений тока нагрузки с высшими гармониками и интергармониками с возможностью статистической их обработки и оценки потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети. Результаты численного эксперимента и их графическое представление, а также статистическая обработка полученных результатов позволили, установить еще одну из

возможных причин возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение) обусловленную нелинейной нагрузкой.

5. Результаты численного эксперимента показали, что когда на каноническую гармонику накладываются, ряд интергармоник одной из причин увеличение потерь мощности, за счет добавочных потерь связан с появлением постоянной составляющей в составе сигнала (ток, напряжение). Численный эксперимент проводился на примере сигнала состоящих из следующих частот (50, 92, 167, 270, 273, 276, 279, 282, 285, 288, 291) [Гц] с соответствующими амплитудными значениями (220, 40, 40, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20) [В]. Как известно, когда несинусоидальность обусловлена только гармониками, кратные 50 Гц, постоянная составляющая отсутствует, разумеется, при отсутствии постоянной составляющей в исходном несинусоидальном сигнале.

6. Численный эксперимент также показал, что сумма основной гармоники и интергармоник ведет себя как случайный процесс, тогда как каждая из слагаемых временных функций детерминированы. Интересным является тот факт, что при отсутствии некоторых интергармоник (276 Гц выше приведенном примере) процесс преобразуется в устойчивую функцию со случайно изменяющейся амплитудой в сторону возрастания времени и представляющей одну из реализаций случайного процесса.

7. Разработан ВП для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия, с учетом, что в составе нагрузочного тока возможны интергармоники.

Практическая значимость полученных результатов:

Разработанные, виртуальные приборы, позволяют обосновать и исследовать влияние дополнительных, ранее трудно учитываемых факторов на потери мощности и энергии в проводящих элементах промышленных сетей, что должно использоваться при оценке потерь в процессе эксплуатации промышленных сетей, содержащих нелинейные нагрузки.

Результаты диссертационной работы рекомендованы для анализа

возможных добавочных потерь в службе эксплуатации промышленных сетей, а также используются для проведения исследовательских работ на кафедре «Электроэнергетика» КГТУ им. И. Раззакова, при анализе степени влияния различных, трудно учитываемых факторов на величину технических потерь в проводящих элементах промышленных сетей.

Разработанные методы моделирования ГЭН используются в дипломном и курсовом проектировании на выше указанной кафедре.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Структурная схема в среде Simulink и имитационная модель исследуемой промышленной сети в среде SimPowerSystems, с результатами численного эксперимента;

2. Многофункциональный виртуальный прибор на основе LabVIEW, предназначенный для исследования влияния различных факторов на потери мощности и электроэнергии в проводящих элементах промышленных сетей и имеющий возможность рассчитать электрическую нагрузку исследуемого элемента сети;

3. Инструментарий в виде ВП для моделирования мгновенных значений тока нагрузки с высшими гармониками и интергармониками с возможностью статистической их обработки и оценки потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети;

4. Виртуальный прибор для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия;

5. Результаты анализа влияния различных факторов на потери в проводящих элементах на основе компьютерного моделирования режимов с использованием LabVIEW и Simulink/ SimPowerSystems.

Личный вклад соискателя. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Из работ, которые опубликованы в соавторстве, использованы только те положения и идеи, которые являются результатом собственных исследований соискателя.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на

- VII международной научно-практической конференции «Интеграционные прогрессы в научно-техническом и образовательном пространстве» (Москва-Бишкек КГТУ-НИУ МЭИ, 2021 г.);
- Международной научной конференции «Региональный вуз – основа развития региона» (Токмок, 2022 г.);
- Международной научно-практической конференции посвященной 70-летию известного ученого М.Дж. Джаманбаева (Бишкек, 2022);
- Международной научно-практической конференции «Роль науки и инновационных технологий в устойчивом развитии горных территорий и экосистем» (Бишкек, 2022);
- 65- ой международной сетевой научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов магистрантов и студентов «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Бишкек, 2023);
- 30-ой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика (Бишкек, 2024)

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Основные научные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 12 печатных работах, имеется 3 патента на изобретение (от Кыргызпатент).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и 2 приложений; содержит 139 стр. основного текста, включая 54 рисунка, 11 таблиц, и библиографический список использованной литературы из 114 наименований.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. АНАЛИЗ ПРИЧИН УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. ПОСЛЕДСТВИЯ УХУДШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1. Введение

В этом разделе изложены некоторые особенности энергетических процессов в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии. В научных публикациях отмечается необходимость учета этих процессов [1, с.38 2, с.5]: для проведения контроля и учета качества электрической энергии (КЭ); измерения и анализа причин возникновения дополнительных потерь в сетях.

Важность этих вопросов определяется тем, что потери электроэнергии являются важнейшим показателем экономичности работы электрических сетей и одним из главных индикаторов эффективности деятельности энергоснабжающих организаций. Следовательно, необходимы разработки соответствующих инструментальных средств изучения процессов, позволяющих учитывать влияние качества электроэнергии на возникновения дополнительных потерь в сетях.

1.2. Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии

К искажающим нагрузкам (так в дальнейшем мы будем называть нагрузки, ухудшающие качество электроэнергии) относятся нагрузки с нелинейными характеристиками, с несимметричными трехфазными сопротивлениями и с сопротивлениями, изменяющимися во времени.

При рассмотрении ряда проблем не учёт выше отмеченных энергетических процессов может привести к некорректным выводам или к значительным затруднениям [2, с.5].

В настоящее время к существующим электросетям подключено множество новых типов оборудования, на которые эти сети попросту не рассчитаны, например, солнечные панели, ветряки, инверторы, электромобили

и аккумуляторы для зданий, новая силовая электроника, линии передачи постоянного высоковольтного тока и многие другие. В результате образуется сложная система, которая требует постоянной оценки качества электроэнергии по ряду ключевых показателей, таких как напряжение и несинусоидальность тока в сети. Необходимость в постоянной оценке КЭ заключается в том, что даже незначительные колебания напряжения могут вызывать сильный дискомфорт у тысяч людей из-за мигания осветительных приборов. Рост напряжения сверх нормы всего на 1% приводит к росту реактивной мощности на электромоторах до 7%. Падение напряжения на 15% может сделать запуск электродвигателей невозможным.

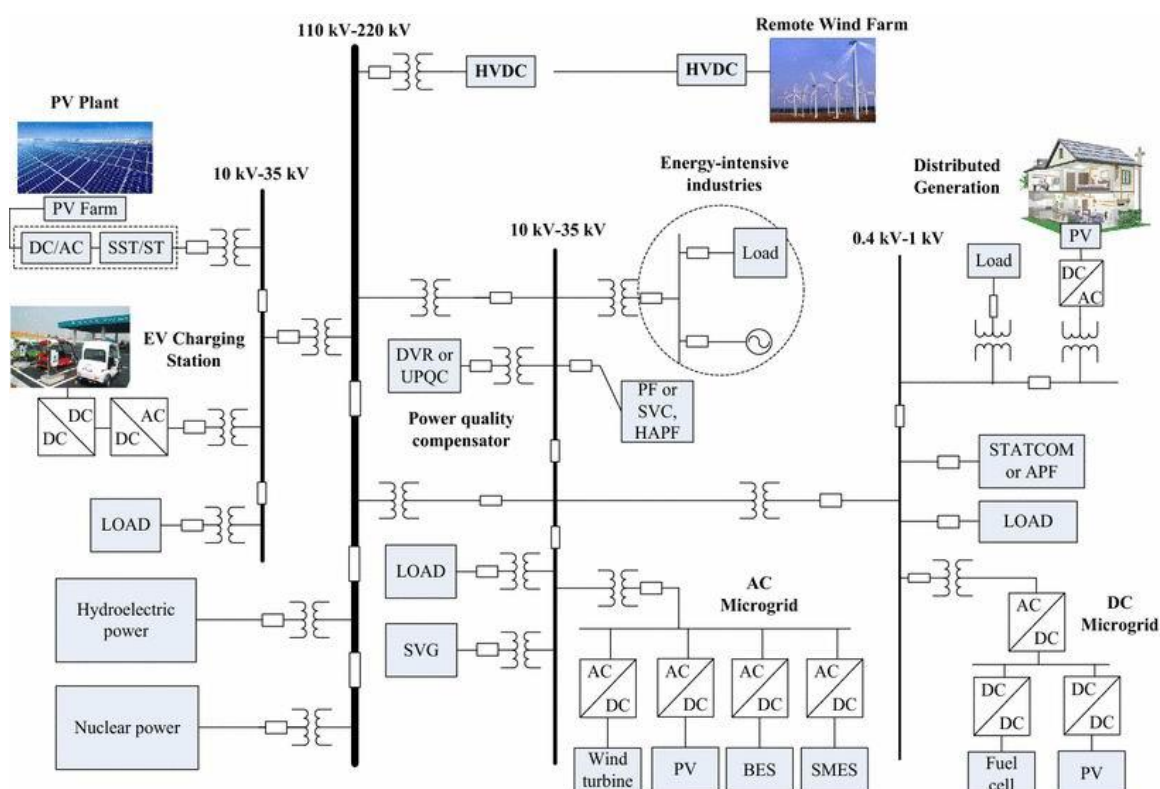


Рисунок 1.2.1 - Типичная современная «умная» распределительная электросеть с микросетями

По мнению многих специалистов для «умных» сетей (smart grid) (рисунок 1.2.1) стабильность качества электроэнергии играет особенно важную роль, так как эти сети объединяют разных потребителей (промышленность, транспорт, домохозяйства и т.д.) и используют разные источники энергии. Некачественная энергия не только угрожает поломкой дорогостоящей электроники, но и лишает

«умную» сеть главного достоинства – надежности и эффективности. В результате крупные инвестиции в smart grid оказываются потраченными впустую [3, э.лит.].

Характерной особенностью искажающих нагрузок является то, что они снижают КЭ в системах электроснабжения и являются источниками высших гармоник, трехфазных симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей и модуляции. Иначе говоря, можно считать, что искажающие нагрузки обладают преобразовательными свойствами: получая энергию из сети, такие нагрузки большую часть ее используют, превращая в другие виды энергии, а оставшаяся часть передается обратно в сеть в виде искажений, образуя аномальные составляющие тока и напряжения (кратные и некратные гармоники, составляющие обратной и нулевой последовательностей) [4,с.36, 5,с.102]. Поток энергии, поступающий от сети, который назовем основным потоком энергии (мощность этого потока — основная мощность), определяется основной гармоникой, симметричной составляющей прямой последовательности, если источники э. д. с. системы симметричны и синусоидальны. Поток энергии, преобразуемый искажающей нагрузкой и направляемый обратно в сеть в виде искажений, т. е. вторичный поток энергии (соответственно, вторичная мощность) определяется аномальными составляющими тока и напряжения [6, с.104].

Дополнительные потери энергии обуславливаются вторичными мощностями, которые вызваны искажающими свойствами нагрузок. Поэтому необходимо разделить общие дополнительные потери на такие составляющие как обусловленные нелинейностью, несимметрией и модуляцией токов и напряжений нагрузок.

Для этого аномальные составляющие тока и напряжения резкопеременных нагрузок, создающих модуляцию, представляются не в виде некратных субгармоник [4,с.36, 5,с.102], а в виде отклонений напряжения и тока от среднегеометрических значений [6,с.104, 7,с.26]:

$$\dot{U}_x = \dot{U} - \dot{U}_{sr}; \quad (1.2.1)$$

$$\dot{I}_x = \dot{I} - \dot{I}_{sr}. \quad (1.2.2)$$

Среднегеометрическое значение напряжения (тока) за время усреднения T_{us} определяется по выражению

$$\dot{U}_{sr} = \frac{1}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} \dot{U} dt. \quad (1.2.3)$$

Отметим, что *модуляция напряжений и токов чаще всего имеет повторяющийся неперiodический характер, но для анализа режимов нередко считают процессы квазипериодическими, и в качестве времени усреднения принимается один или несколько периодов колебаний.*

Составляющие напряжения и тока, входящие в выражения (1.2.1) и (1.2.2)

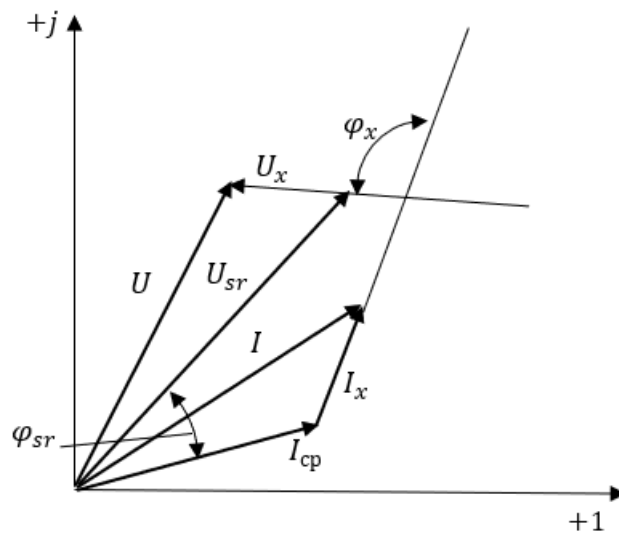


Рисунок 1.2.2 - Векторная диаграмма модулированных напряжений и токов [1,с.38].

представлены на векторной диаграмме (рисунок 1.2.2), где концы векторов напряжения и тока нагрузки меняют положение в соответствии с показанными годографами.

При определении основной мощности резкопеременных нагрузок используются среднегеометрические составляющие напряжения, тока:

$$\underline{S}_{osn} = \dot{U}_{sr} I_{sr}^*, \quad (1.2.4)$$

а вторичные мощности зависят от отклонения напряжения и тока от среднегеометрических значений:

$$\underline{S}_{vt} = \frac{1}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} \dot{U}_x I_x^* dt; \quad (1.2.5)$$

$$P_{vt} = \frac{1}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} U_x I_x \cos \varphi_x dt; \quad (1.2.6)$$

$$Q_{vt} = \frac{1}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} U_x I_x \sin \varphi_x dt. \quad (1.2.7)$$

В случае, когда нагрузкой создаются все виды искажений, то соображения, приведенные для резкопеременных нагрузок, надо отнести к симметричной составляющей прямой последовательности основной гармоники, для которой будут справедливы выражения (1.2.1) - (1.2.7). При передаче основного потока энергии справедливо утверждение, что баланс мощностей, т. е. сумма мощностей источников э. д. с. (генераторов энергосистемы) равна сумме основных мощностей нагрузок и мощностей потерь энергии передающих устройств.

Искажающие нагрузки, составляющие напряжения и тока которых относятся к аномальным, имеют для первой гармоники симметричные составляющие обратной и нулевой последовательностей, а для высших гармоник - дополнительно еще и прямой последовательности, и могут быть определены выражениями:

$$u_{an} = u_{1x} + \sum_{v=2}^{\infty} u_{prv} + \sum_{v=1}^{\infty} u_{obr v} + \sum_{v=1}^{\infty} u_{nulv}; \quad (1.2.8)$$

$$i_{an} = i_{1x} + \sum_{v=2}^{\infty} i_{prv} + \sum_{v=1}^{\infty} i_{obr v} + \sum_{v=1}^{\infty} i_{nulv}, \quad (1.2.9)$$

где u, i - мгновенные значения напряжения и тока.

В выражениях (1.2.8) и (1.2.9) составляющие напряжения и тока смоделированы, следовательно, они могут быть представлены суммой среднегеометрических составляющих и отклонений от них и определены следующим образом:

$$u_{prv} = u_{prvsr} + u_{prvx}; \quad (1.2.10)$$

$$u_{obr v} = u_{obr vsr} + u_{obr vx}; \quad (1.2.11)$$

$$u_{nulv} = u_{nulvsr} + u_{nulvx}. \quad (1.2.12)$$

Для тока выражения аналогичны.

Для одной фазы среднее значение вторичной мощности за время усреднения можно определить по уравнению

$$P_{vt.f} = \frac{1}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} u_{an} i_{an} dt. \quad (1.2.13)$$

Подставив значения напряжений и токов и просуммировав по трем фазам, получим:

$$\begin{aligned} P_{vt} = & 3U_{obr1sr} I_{obr1sr} \cos \varphi_{obr1sr} + 3U_{nul1sr} I_{nul1sr} \cos \varphi_{nul1sr} + \\ & + \sum_{v=2}^{\infty} 3[U_{obr vsr} I_{obr vsr} \cos \varphi_{obr vsr} + U_{nulvsr} I_{nulvsr} \cos \varphi_{nulvsr}] + \\ & + \sum_{v=2}^{\infty} 3U_{prvsr} I_{prvsr} \cos \varphi_{prvsr} + \frac{3}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} U_{pr1x} I_{pr1x} \cos \varphi_{pr1x} dt + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} [U_{obr1x} I_{obr1x} \cos \varphi_{obr1x} + U_{nul1x} I_{nul1x} \cos \varphi_{nul1x}] dt + \\
& + \frac{3}{T_{us}} \sum_{v=2}^{\infty} \int_0^{T_{us}} [U_{prvx} I_{prvx} \cos \varphi_{prvx} + U_{obrvx} I_{obrvx} \cos \varphi_{obrvx} + \\
& + U_{nulvx} I_{nulvx} \cos \varphi_{nulvx}] dt. \tag{1.2.14}
\end{aligned}$$

Следует отметить, что *средние значения мощностей определяются суммой средних значений произведений токов и напряжений однородных составляющих. Произведения разнородных составляющих после усреднения равны нулю, что легко доказывается.*

Поток энергии, направленный от искажающей нагрузки обратно в сеть и к другим смежным нагрузкам, является, по существу, вторичной мощностью и является отрицательной величиной, поскольку источником является сама нагрузка.

Используя выражение (1.2.14) можно разделить вторичную мощность на составляющие, обусловленные тем или иным видом искажения. Например, вторичная мощность несимметрии определяется первыми тремя слагаемыми, четвертый член - вторичной мощностью несинусоидальности, а сумма пятого и шестого членов - вторичную мощность модуляции:

$$P_{vt} = P_{vt.ne} + P_{vt.ns} + P_{vt.m} ,$$

где $P_{vt.ne}$, $P_{vt.ns}$, $P_{vt.m}$ - вторичные мощности соответственно несимметрии, несинусоидальности, модуляции.

Следует отметить, что в (1.2.14) не все слагаемые по величине соизмеримы, к тому же вся сумма не превышает 1 % потребляемой и только при больших искажениях (при превышении допустимых значений показателей КЭ) она может достичь 3 - 4 %.

Основная доля вторичной мощности несимметрии передается по каналу

первой гармоники, а доля мощности, передаваемая каналами высших гармоник, соответствующая третьему слагаемому (1.2.14), составляет не более десятых долей процента её первых двух членов.

Аналогично можно сказать и о вторичной мощности модуляции, определяемой в (1.2.14) пятым членом, значение которого на два порядка выше остальных.

Как было отмечено выше, вторичная мощность определяет дополнительные потери, поэтому их роль на практике велика, хотя величины и не столь значительны. Контроль дополнительных потерь может осуществляться путем измерения их величин непосредственно для искажающих нагрузок.

На основании выше сказанного в [2,с.32] были предложены те технические решения, которые начали частично реализоваться только в настоящее время с помощью АСКУЭ, т.е. *«...задача повышения точности учета расхода электроэнергии не может быть решена простым повышением класса точности приборов, которые измеряют суммарные мощности $P_{\text{сум}} = P_{\text{осн}} + P_{\text{вт.}}$ »* В этой работе предлагается: *«При разработке приборов и систем учета энергии высокой точности необходимо считаться со встречными потоками вторичных мощностей, так как энергия, выдаваемая системой, определяется не суммарной мощностью, а основной. Повышение точности измерения энергии должно сопровождаться увеличением информативности систем электроснабжения, т. е. измерением суммарной мощности как величины, характеризующей потребление электроэнергии нагрузкой вторичной мощности (мощности дополнительных потерь, связанных с искажениями) и основной мощности, определяющей энергию от сети.*

Поскольку передача энергии от источника к нагрузке осуществляется основным потоком, то вопрос компенсации реактивной мощности должен решаться применительно к реактивной мощности этого потока, что подтверждает вывод в [8,с.128], где при рассмотрении несинусоидальных и несимметричных режимов показано, что компенсация реактивной мощности должна проводиться по первой гармонике и по составляющей прямой

последовательности соответственно.

Величина вторичной мощности не только оценивает дополнительные потери, но и дает энергетическую характеристику искажениям, поскольку она определяет эту энергию, которая преобразуется в аномальные составляющие напряжения и тока...»

Далее автором [2,с.5] установлены зависимости вторичной мощности от аномальных составляющих напряжений, характеризующих показатели КЭ (ПКЭ) следующим образом.

Активные вторичные мощности несимметрии и несинусоидальности с ПКЭ связаны следующими выражениями:

$$P_{vt.nes} = U_{obr}^2 g_{e ne} = U_{nom}^2 K_{ne}^2 g_{e ne}; \quad (1.2.15)$$

$$P_{vt.ns} = U_1^2 K_{ns}^2 G, \quad (1.2.16)$$

где

$$K_{ns} = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}{U_1^2}} = \sqrt{\sum_v m_v} - \text{коэффициент несинусоидальности};$$

$$G = \frac{\sum_{v=2}^{\infty} m_v g_{e v}}{\sum_{v=2}^{\infty} m_v^2}; \quad (1.2.17)$$

$g_{e v}$ - эквивалентная активная проводимость системы для токов v - й гармоники.

Выражая I_x через напряжение U_x , из (1.6) можно получить вторичную мощность модуляции:

$$P_{vt} = \frac{g_e}{T_{us}} \int_0^{T_{us}} U_x^2 dt = \sigma_u^2 g_e, \quad (1.2.18)$$

где σ_u - среднеквадратическое отклонение напряжения от среднегеометрического значения за время усреднения.

Показатели, определяющие КЭ при искажениях, связаны с аномальными

составляющими напряжения, т.е. ее коэффициентом несинусоидальности, коэффициентом обратной последовательности и т.д. Однако ПКЭ не могут быть критериями, которые бы характеризовали степень участия искажающих нагрузок в снижении КЭ. Но такая оценка необходима, так как она дает возможность возложить на виновника ответственность за ухудшение КЭ, как это предусматривается в ГОСТ 13109—67.

В [2,с.5] предполагается, что вторичная мощность может служить этим критерием, так как она характеризует ту часть энергии, которая преобразуется в искажающей нагрузке и передается обратно в сеть в виде аномальных составляющих. Чтобы использовать мощность как показатель степени участия искажающих нагрузок в снижении КЭ, рассмотрим случай, параллельной работы нагрузок.

Энергетические процессы параллельно работающих двух (нескольких) искажающих нагрузок различаются тремя вариантами:

- а) из параллельно работающих нагрузок одна является искажающей, а другая - нет;
- б) нагрузки с различным характером искажения;
- в) нагрузки с одинаковым характером искажения.

При рассмотрении предполагаем, что искажающая нагрузка вносит искажения одного вида.

На рисунке 1.2.3, а) и б) рассмотрен случай замены искажающей нагрузки N_2 системы двумя идеальными источниками тока $J_{H2}^{(n)}$ и $J_{H2}^{(и)}$ в однофазном изображении. Это позволяет рассмотреть распределение основного и вторичного потоков энергии независимо (рисунке 1.2.3, в и г). Питающая энергосистема на схеме заменена эквивалентным генератором $(E_э, Z_э)$;

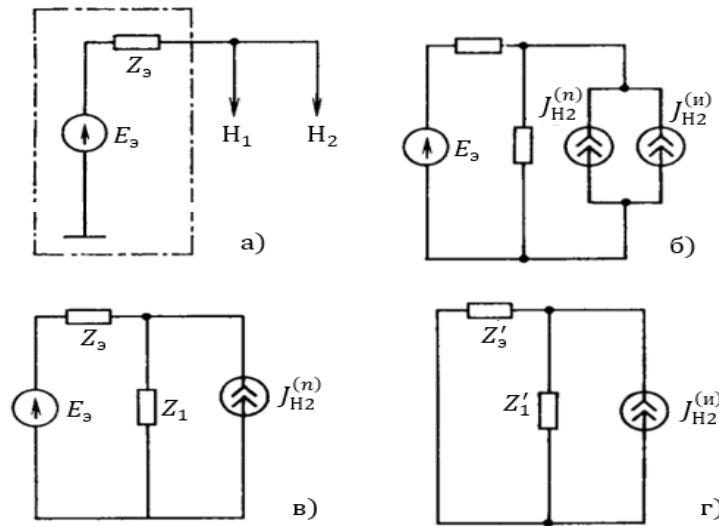


Рисунок 1.2.3 - Схема электроснабжения (а), эквивалентная схема замещения (б), эквивалентная схема замещения для нормальных (в) и аномальных (г) составляющих токов

искажающая нагрузка - двумя источниками тока: нормальной составляющей $J_{H2}^{(n)}$ и аномальной составляющей $J_{H2}^{(и)}$. При этом $J_{H2}^{(n)}$ соответствует симметричной составляющей тока прямой последовательности при несимметрии, среднегеометрической составляющей - при модуляции, первой гармоникой - при несинусоидальности токов, а $J_{H2}^{(и)}$ - симметричной составляющей обратной последовательности, отклонением от среднегеометрической составляющей, высшими гармониками тока. Но надо иметь в виду, что сопротивления в схеме (рисунок 1.2.3, г) Z_3' и Z_1' отличаются от параметров схемы рисунков 1.2.3, б), а для высших гармоник они зависят также от порядка гармоник.

При анализе режимов аномальных составляющих токов и напряжений системы, изображенной на схеме рис. 1.2.2, г, автор [2,с.5] пришел к заключению, что вторичная мощность искажающей нагрузки - величина отрицательная (мощность генерируется), которая потребляется в сопротивлениях сети и нагрузки H_1 , при этом мощности положительные.

Выражение для баланса вторичных мощностей имеет вид

$$P_{вт. H2}^{(и)} = P_{вт. H1}^{(и)} + P_{вт. с}^{(и)}, \quad (1.2.19)$$

в этом уравнении $P_{вт.с}^{(и)}$ представляет вторичную мощность, потребляемую системой.

В рассмотренном случае только нагрузка H_2 влияет на снижение качества энергии, что определяется знаком вторичной мощности. В случае, когда две искажающие нагрузки разнохарактерны (второй случай), в них возникают аномальные составляющие токов первого и второго видов искажения. В этом случае система, схема которой показана на рисунке 1.2.4, а, представляется эквивалентной схемой замещения (рисунок 1.2.4, а): заменой каждой из двух нагрузок тремя источниками тока.

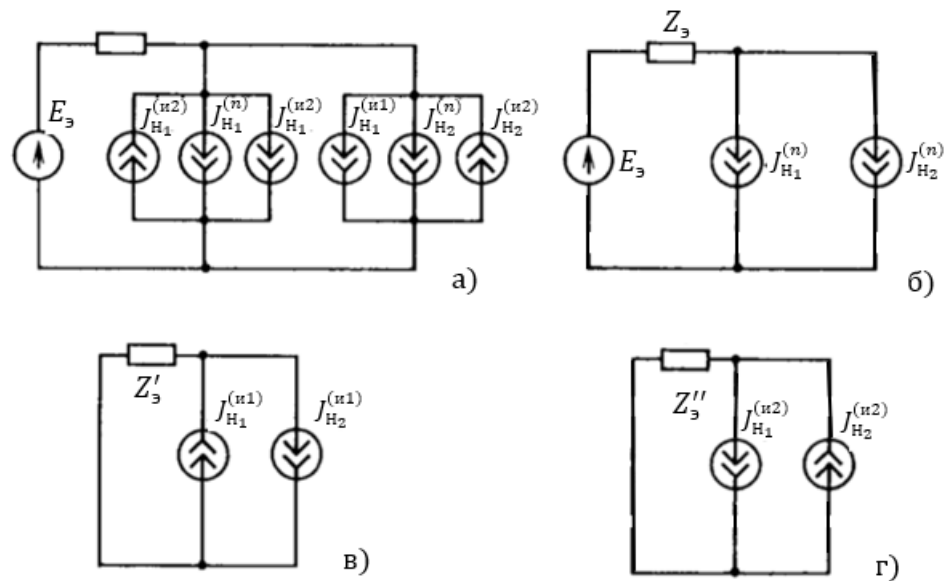


Рисунок 1.2.4 - Эквивалентная схема замещения при двух разнохарактерных искажающих нагрузках (а), эквивалентные схемы замещения для нормальных (б), аномальных первого (в) и второго (г) видов искажения составляющих токов

На рисунках 1.2.4, в) и г) рассматриваемая система представлена соответственно первым и вторым видами искажения, тогда баланс вторичных мощностей определяется выражениями:

$$P_{вт.н1}^{(и1)} = P_{вт.с}^{(и1)} + P_{вт.н2}^{(и1)}; \quad (1.2.20)$$

$$P_{вт.н2}^{(и2)} = P_{вт.с}^{(и2)} + P_{вт.н1}^{(и2)}. \quad (1.2.21)$$

Так как источником первого вида искажения является нагрузка H_1 , следовательно, для этого вида искажения вторичная мощность имеет отрицательный знак, а для второго вида - положительный. Поэтому можно сделать вывод, что суммирование вторичных мощностей разнохарактерных искажений недопустимо, как было сделано для случая одной нагрузки со всеми видами искажений в выражении (1.2.15). В таком случае теряется информация о степени влияния каждой нагрузки для того и другого видов искажения.

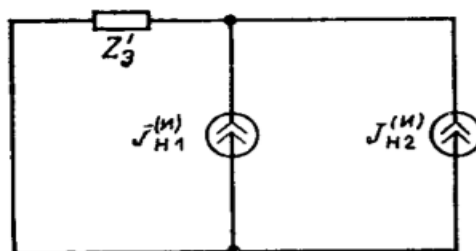


Рисунок 1.2.5 - Эквивалентная схема замещения для аномальных составляющих токов при двух одно характерных искажающих нагрузках

Для третьего случая (с нагрузками, имеющими одинаковый характер искажения) можно составить эквивалентную схему замещения распределения аномальных составляющих токов (рисунок 1.2.5), заменяя искажающие нагрузки двумя источниками тока каждую ($J_{H2}^{(n)}$ и $J_{H2}^{(i)}$).

Уравнение баланса вторичных мощностей имеет вид

$$P_{\text{вт.н1}}^{(i)} + P_{\text{вт.н2}}^{(i)} = P_{\text{вт.с}}^{(i)} \quad (1.2.22)$$

В первом варианте мощности обеих искажающих нагрузок могут быть отрицательны, при этом они складываются. Во втором варианте мощности разноименного знака, т. е. одна из нагрузок имеет положительную вторичную мощность и является потребителем вторичного потока энергии, компенсируя искажения. Как частный случай второго варианта, сумма вторичных мощностей в левой части (1.2.22), а, следовательно, и вторичная мощность, потребляемая

системой, может равняться нулю, тогда система двух нагрузок вносить искажения не будет.

Рассмотрим примеры этих вариантов при разных видах искажений. В качестве примера двух параллельно работающих искажающих нагрузок рассмотрим работу двух несимметричных нагрузок с изолированной нейтралью. Анормальной составляющей тока в этом случае является составляющая обратной последовательности. Вторичная активная мощность, потребляемая сетью, определяется по выражению

$$P_{вт. с}^{(обр)} = (I_{обр. с})^2 R_э, \quad (1.2.23)$$

где

$$I_{обр. с} = |\dot{J}_{обр. н1} + \dot{J}_{обр. н2}|. \quad (1.2.24)$$

Ток и вторичная мощность сети зависят не только от токов обратной последовательности, но и от разности их фаз.

В первом варианте обе нагрузки усиливают несимметрию, во втором - одна из несимметричных нагрузок (компенсирующая) может уменьшить общую несимметрию, при этом $I_{обр. с}$ уменьшится при полной компенсации несимметрии

$$\dot{I}_{обр. с} = \dot{J}_{обр. н1} + \dot{J}_{обр. н2} = 0,$$

т. е. токи обратной последовательности нагрузок при этом будут в противофазе и $P_{вт. с} = 0$; при этом искажений напряжения не будет.

Аналогичные выводы можно сделать для каждой гармоники при двух нелинейных нагрузках.

При двух резкопеременных нагрузках вторичная мощность, потребляемая системой, может быть определена как

$$P_{вт. с}^{(м)} = \frac{R_c}{T_{yc}} \int_0^{T_{yc}} I_{xc}^2 dt, \quad (1.2.25)$$

где

$$\dot{I}_{xc} = \dot{J}_{x н1} + \dot{J}_{x н2}. \quad (1.2.26)$$

Из (1.2.26) следует, что в зависимости от разности фаз $j_{x_{н1}}$ и $j_{x_{н2}}$ искажения могут усиливаться или ослабевать, т. е. в последнем случае одна из нагрузок является компенсирующей, и это может быть выявлено значением и знаком вторичной мощности нагрузок.

Для модуляции характерно, что начальные фазы отклонения токов от среднегеометрических значений ($j_{x_{н1}}$, $j_{x_{н2}}$) изменяются во времени, и если частоты модуляции различны, то и режимы будут меняться во времени. В этом случае вторичные мощности характеризуют усредненные режимы за время $T_{ус}$.

Как видно из приведенных выше рассуждений, оценивать степень участия нагрузок в снижении КЭ можно только по вторичным мощностям, а не по току и, тем более, не по напряжению.

В [9,с.53], с рядом других актуальных вопросов, рассматривался контроль КЭ и, в частности, сравнивались способы оценки степени участия искажающих нагрузок в снижении качества по аномальным составляющим токов и по вторичным мощностям. В статье отмечается, что наиболее обоснован способ оценки по вторичным мощностям, однако величина последних зависит не только от характеристики собственной нагрузки, но и от структуры сети. Можно добавить, что, как показали натурные измерения, величина вторичной мощности, например, несимметрии, в системе, содержащей тяговую нагрузку, изменяется во времени, как и аномальные составляющие тока. Поэтому оценку степени участия нагрузок в искажении режимов можно производить статистическими методами по вторичной мощности.

К искажающим нагрузкам, приводящим к снижению качества электроэнергии, относятся также широко применяемые силовые электронные оборудования. К уже существующим нелинейным нагрузкам – насыщенным трансформаторам, электродвигателям и сварочному оборудованию – добавились статические силовые преобразователи и устройства частотного регулирования электроприводов, импульсные источники питания и т.д. В начале 80-х годов гармоники в электрических сетях впервые начали считаться

серьезной проблемой в США, а потом в Европе и Японии. Это все было, в первую очередь, связано с глобальным распространением ИТ – технологий. При этом удельный вес нелинейной нагрузки, которая является источником высших гармоник и интергармоник, рос неуклонно вверх [10, с.284, 11, с.88].

Гармониками являются токи или напряжения, имеющие частоту, кратную основной частоте переменного тока.

Интергармониками являются токи или напряжения, не кратные основной частоте переменного тока. Полного понимания природы электромагнитных возмущений, ассоциирующихся с интергармониками, еще нет, и в настоящее время к этому явлению возник повышенный интерес [10, с.284].

Интергармоники вне зависимости от режимов работы оборудования всегда присутствуют в системе электроснабжения, и в наше время с резким увеличением количества силовых систем их практическое влияние на оборудование стало еще более ощутимым [10, с.284]. При проведении анализа формы синусоиды переменного тока гармоники и интергармоники определяются как компоненты спектра в квазиустойчивом состоянии в определенном диапазоне частот [10, с.284]. В табл. 1.2.1 представлены их математические определения.

Таблица 1.2.1. - Спектральные составляющие волны (частоты f)

Гармоника	$f = n \cdot f_1$, где $n > 0$ (n – числом кратности)
Компонент постоянного тока	$f = n \cdot f_1$ для $n = 0$
Интергармоника	$f \neq n \cdot f_1$, где $n > 0$
Субгармоника	$f > 0$ Гц и $f < f_1$

f_1 - основная частота по напряжению

Термин «субгармонический» не имеет официального определения – это лишь частный случай интергармоники, когда частота интергармоники меньше частоты основной гармоники. Тем не менее, этот термин часто встречается в текстах и употребляем в профессиональном обороте.

Стандарт МЭК 61000-2-1 дает следующее определение **интергармоники**: Между гармониками основной (силовой) частоты и тока могут наблюдаться иные частотные составляющие, которые не кратны основной частоте. Они могут проявляться и как обособленные частотные составляющие, и как совмещенные [10, с.284].

Интергармоническая частота – любая частота, не кратная основной. По аналогии с порядком кратности гармоник порядок интергармонической частоты основан на отношении к основной частоте. Если это отношение меньше единицы, то такую гармоническую частоту называют субгармонической. В соответствии с рекомендацией МЭК порядок интергармонических частот обозначается буквой "m" [11, с.88].

Интергармоническое напряжение (аналогично и для тока) - синусоидальное напряжение, имеющее промежуточную между двумя гармониками частоту, т. е. частоту, не кратную основной частоте [10, с.284].

Источники интергармоник. Два механизма способствуют появлению интергармоник.

Первый заключается в возникновении составляющих в частоте питающего напряжения и его гармониках в результате изменения их амплитуд и углов фаз. Это вызывается быстрым изменением значений токов в электроустановках и оборудовании, которые могут быть причиной перепада напряжения. Возмущения вызываются нагрузками в переходных режимах постоянно или временно или во многих случаях при возникновении модуляции токов и напряжений. Эти возмущения имеют случайный характер и зависят от оборудования и действующих процессов [10, с.284].

Вторым механизмом является асинхронное переключение полупроводниковых устройств статических преобразователей. Одним из примеров является преобразователи частоты и устройства с широтно-импульсной модуляцией. Интергармоники, производимые ими, можно обнаружить почти в любой части спектра питания [10, с.284].

В некоторых изделиях возникают оба механизма появления интергармоник. Интергармоники иногда появляются при любых значениях напряжения и могут перетекать из одних систем в другие. Так, интергармоники, которые образовались в сетях высокого и среднего напряжения, переходят в сети низкого напряжения и наоборот.

Амплитуда интергармоник редко превышает 0,5 % значения амплитуды основной частоты, но в условиях резонанса бывают и большие значения [10, с.284].

Основные источники возмущений включают:

- дуговые нагрузки;
- электроприводы с переменной нагрузкой;
- статические преобразователи, в частности, преобразователи частот с прямым и косвенным управлением;
- устройства управления фазами.

Интергармоника как показатель качества. В 1994 г. европейским стандартом EN 50160 в электротехническую практику введён новый показатель качества электроэнергии - интергармоники (ИГ). Согласно данному стандарту Международной электротехнической комиссии (МЭК) и документу Рабочей группы IEEE, интергармоники представлены как гармонические колебания с частотами, не кратными частоте питающей сети [10, с.284, 11, с.88].

Публикация такого рода документов говорит о повышенном внимании за рубежом к проблемам качества электрической энергии, а также, что специалисты стран, участвующих в работе технического комитета ТК 77 МЭК, выработали согласованные требования к составу показателей КЭ, методам измерений, точности их измерений, характеристикам средств измерений, организации мониторинга КЭ, оценке КЭ по результатам измерений [10, с.284].

В настоящее время в Российской Федерации действует межгосударственный стандарт ГОСТ Р 54149-2010, который также не даёт каких-либо определенных указаний по нормированию ИГ [10, с.284].

В связи с негативным влиянием интергармоник на элементы систем электроснабжения, постоянное увеличение электроприемников, являющихся источниками ИГ, в будущем следует уделять внимание задачам исследования явления – появления интергармоник, а также приведения действующей нормативной базы к международным стандартам.

1.3. Задачи контроля качества электроэнергии и инструментальные средства их исследования в системах электроснабжения

К основным задачам контроля качества электроэнергии (ККЭ) относятся: обнаружение помех и их оценка [12, с.17]; регистрация измеренных числовых характеристик в целях обработки и отображения результатов [13, с.3, 14,с.49, 15,с.49, 16,с.16]; оценка измеренных значений показателей качества электроэнергии на соответствие установленным требованиям [17,с.69, 18,с.29]; определение источника помех [19,с.45, 20,с.66]; проведение коммерческих расчетов между поставщиком и потребителем электроэнергии [21,с.228, 22, с.116, 23,с.67, 24,с.91, 25с.31].

Для организации измерений необходимо определить вид контроля, точку осуществления измерений и виды контролируемых показателей качества электроэнергии (ПКЭ). В зависимости от длительности наблюдения выделяются два вида организации контроля: периодический [26,с.1210, 27.с.301, 28,с.417, 29,с.144, 30,с.61, 31,с.5] и постоянный [32,с.24, 33,с.35, 34,с.4, 35,с.179]. Их отличие заключается в непрерывности времени измерений и обработки результатов [36,с.295, 37,с.23, 38,с.22, 39,с.21, 40,с.414, 41,с.149].

С позиций управления КЭ наиболее актуальной следует считать разработку моделей для оценки КЭ в системе и различных инструментальных методов анализа КЭ [51,с.6]. Для оценки КЭ по системе в целом при анализе основных требований к моделям электрических систем, содержащих распределенные смешанные источники искажения напряжения, необходимо решение следующих задач[52,с.171]:

- управление КЭ или целенаправленного проведения технических или организационных мероприятий, направленных на обеспечение КЭ;
- выбор средств обеспечения КЭ и места их применения;
- определение частотных характеристик электроэнергетической системы (ЭЭС);
- оценка КЭ в зависимости от схемы ЭЭС, состава ее потребителей и видов электроприемников;
- оценка КЭ в зависимости от графика нагрузки ЭЭС;
- определение технических условий на присоединение новых потребителей.

Как отмечено [52,с.171], некоторые из этих задач не могут быть решены с помощью средств измерений (СИ) ПКЭ или их решение потребует большого парка СИ. Вместе с тем, перечисленные задачи можно рассматривать как проектные, прогнозные, оперативные, когда контроля КЭ в том смысле, как это указано в ГОСТ 13109-97, не требуется, но необходима оценка возможного состояния ЭЭС по КЭ, поэтому *такие задачи могут быть решены только расчетным путем или методом компьютерного моделирования.*

В работе [50,с.86] предлагают в качестве одного из вариантов решения задачи по контролю качества электроэнергии использование *системы мониторинга, основанной на методах виртуального (компьютерного) моделирования физических процессов.* На сегодняшний день методы виртуального (компьютерного) моделирования широко применяются во всех областях науки и производства, так как они позволяют оперативно и с наименьшими затратами найти определенные параметры конечного результата.

Компьютерное моделирование в настоящее время является основным инструментом исследования, которое позволяет просчитать различные режимы работы электротехнических систем и предсказать их поведение в различных аварийных режимах работы.

В завершение рассмотренных вопросов первой главы отметим, что в последующих главах решены задачи, поставленные в диссертации на основе проведения компьютерных экспериментов с применением методов современной компьютерной технологии.

Во второй главе разработаны виртуальные приборы (ВП) в среде LABVIEW для проведения совместного расчета потерь мощности и температуры перегрева элементов сети методом компьютерного моделирования с учетом качества электроэнергии.

В третьей главе разработаны инструментальные средства в среде SIMULINK для исследования потерь мощности в элементах сети с учетом качества электроэнергии.

В четвертой главе решена задача по расширению функциональных возможностей разработанной в главе 2 компьютерного инструментария в виде виртуального прибора, который осуществляет автоматизации проведение уточняющих расчетов потерь активной электроэнергии во внешней сети предприятия путем моделирования или контроля потребленной электрической нагрузки.

Выводы по главе 1

1. Потребление энергии от сети нагрузки при синусоидальных симметричных э.д.с. генераторов определяется основной мощностью, а вторичные мощности, определяющие дополнительные потери и зависящие от аномальных составляющих тока и напряжения, возникают из-за того, что искажающие нагрузки обладают преобразовательными свойствами.

2. К искажающим нагрузкам, приводящим к снижению качества электроэнергии, относятся также широко применяемые силовые электронные оборудования.

3. В настоящее время к существующим нелинейным нагрузкам – насыщенным трансформаторам, электродвигателям и сварочному оборудованию – добавились статические силовые преобразователи и устройства частотного регулирования электроприводов, импульсные источники питания и т.д. Эти нагрузки способствуют появлению интергармоник.

4. Интергармониками являются токи или напряжения, не являющиеся кратными основной частоте переменного тока. Полного понимания природы

электромагнитных возмущений, ассоциирующихся с интергармониками, еще нет, и в настоящее время к этому явлению возник повышенный интерес.

5. Оценивать степень участия нагрузок в снижении КЭ при их параллельной работе можно по знаку и величине вторичной мощности.

6. С позиций управления КЭ наиболее актуальной следует считать разработку моделей для оценки КЭ в системе и различных инструментальных методов анализа КЭ.

7. Для оценки КЭ по системе в целом при анализе основных требований к моделям электрических систем, содержащих распределенные смешанные источники искажения напряжения, необходимо решение ряда задач (приведены выше), которые *могут быть решены только расчетным путем или методом компьютерного моделирования.*

8. Одним из вариантов решения задачи по контролю качества электроэнергии является использование *системы мониторинга, основанной на методах виртуального (компьютерного) моделирования физических процессов,* которые широко применяются во всех областях науки и производства, так как они позволяют оперативно и с наименьшими затратами найти определенные параметры конечного результата.

9. Несомненным достоинством компьютерных экспериментов на основе моделирования является возможность совместного расчета потери электроэнергии и расчетного значения электрической нагрузки с учётом возможного ухудшения качества электроэнергии. При этом можно учитывать сколь угодно большое количество факторов, обеспечивая тем самым полный контроль влияния всех входных параметров на результат, что не всегда возможно в реальном эксперименте.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. КОМПЬЮТЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРОМПРЕДПРИЯТИЙ

В научных трудах многих ученых обращено внимание, что в настоящий момент пока не существует общепринятой теории мощности, при несинусоидальных напряжениях и токах [85,с.134, 92,с.39], которая могла бы использоваться в качестве основы:

- для оценки качества электропитания;
- определения источников гармонических, интергармонических искажений в системах электроснабжения промпредприятий;
- и расчета добавочных потерь в токопроводящих элементах сети.

В связи свыше сказанным, в работе выдвинута предположения о том, что *ухудшение КЭ, связанное с несинусоидальностью напряжения и тока, может повлиять и на расчетные значения добавочных потерь из-за интергармонических составляющих, вследствие того, что теория расчета потерь была разработана для систем электроснабжения без искажений.*

Учитывая, что важным составляющим энергосберегающих мероприятий промышленного предприятия является, снижение потерь электроэнергии ΔW в его питающих сетях возникает необходимость в разработке инструментария для проверки выдвинутого предположения.

В этом разделе работы в программной среде LabVIEW разработаны соответствующие виртуальные приборы (ВП) [59,с.58, 61,с.11].

2.1. Методы расчета потерь электроэнергии

При известных значениях электроэнергии W_{OC} , отпущенной в сеть, электроэнергии W_{PO} , оплаченной потребителями, а также электроэнергии W_{CH} , затраченной на производственные нужды, можно рассчитать потери

электроэнергии по формуле:

$$\Delta W = W_{OC} - (W_{PO} + W_{CH}). \quad (2.1.1)$$

Эта формула содержит в себе потери, характеризующие техническое состояние сети и режимы ее работы, так называемые технические потери ΔW_T , а также составляющую, которая обусловлена неточностью определения W_{OC} , W_{PO} , W_{CH} . Точности величин W_{OC} и W_{CH} зависят от погрешностей приборов учета электроэнергии (ЭЭ), а точность определения W_{PO} зависит от наличия потребителей без счетчиков, неодновременности оплаты за электроэнергию, хищений ЭЭ и т.п. Для обозначения этой составляющей потерь используют термин "коммерческие потери".

При известных технических потерях фактическое значение коммерческих потерь определяют по формуле

$$\Delta W_K = \Delta W - \Delta W_T. \quad (2.1.2)$$

Технические потери обусловлены электрической нагрузкой (ΔW_H), потерями в трансформаторах и реакторах от их холостого хода (ΔW_X), а также потерями на корону ($\Delta W_{КОР}$).

Методы расчета потерь ЭЭ (ПЭ) зависят от полноты информации о нагрузках элементов электрической сети. Основные расчетные формулы представлены в табл. 2.1.1.

На основе анализа содержания таблицы 2.1.1, можно заключить, что наиболее подходящим методом при разработке ВП является метод поэлементного расчета, так как в этой формуле (табл. 2.1.1, первая строка) токовая нагрузка I скоррелирована с КЭ.

Таблица 2.1.1. - Методы расчета потерь электроэнергии

№ строки	Методы	Формулы	Элементы формул
1	Методы поэлементного расчета	$\Delta W_H = 3\Delta t \sum_{i=1}^k R_i \sum_{j=1}^{T/\Delta t} I_{ij}^2$	k – число элементов сети; I_{ij} – токовая нагрузка i - го элемента с сопротивлением R_i в момент времени j ; Δt – периодичность опроса датчиков, фиксирующих токовые нагрузки элементов
2	Методы характерных режимов	$\Delta W_H = \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i$	ΔP_i – нагрузочные потери мощности в сети в i - м режиме продолжительностью t_i часов; n – число режимов
3	Методы характерных суток	$\Delta W_H = \sum_{i=1}^m \Delta W_i D_{Ei}$	m – число характерных суток, потери электроэнергии за каждые из которых, рассчитанные по известным графикам нагрузки в узлах сети, составляют ΔW_i ; D_{Ei} – эквивалентная продолжительность в году i - го характерного графика
4	Методы времени максимальных потерь τ	$\Delta W_H = \Delta P_{max} \tau$	<p>ΔP_{max} – потери мощности в режиме максимальной нагрузки. Время максимальных потерь τ может определяться на основе следующих выражений:</p> <p>а) по формуле В.В. Кезевича</p> $\tau = \left(0.124 + \frac{T_M}{10^4}\right)^2 \cdot 8760;$ <p>б) по выражению, предложенному сотрудниками института «Энергосетьпроект»,</p> $\tau = \left(2k_Z - 1 + \frac{(1 - k_Z)(1 - k_P)}{1 + k_Z - 2k_P}\right) \cdot 8760;$ <p>в) по формуле</p> $\left. \begin{aligned} \tau &= 8760 k_Z^2 \text{ при } k_Z \geq \frac{2}{3}; \\ \tau &= 5840 k_Z \text{ при } k_Z < \frac{2}{3}. \end{aligned} \right\}$

			<p>В приведенных соотношениях: T_M – число часов использования максимума нагрузки; $k_Z = \frac{P_C}{P_M} = \frac{T_M}{8760}$ – коэффициент заполнения графика нагрузки; $k_P = \frac{P_{min}}{P_M}$ – коэффициент равномерности графика нагрузки; P_C – средняя мощность; P_V – максимальная мощность.</p>
5	Методы средних нагрузок	$\Delta W_H = \Delta P_C k_F^2 T$	<p>ΔP_C – средние потери мощности в сети за время T, k_F – коэффициент формы графика мощности или тока.</p> <p>При известном значении коэффициента заполнения k_Z</p> $k_F = \frac{1090}{T_M} + 0.876 = \frac{0.124}{k_Z} + 0.876.$ <p>Для расчета k_F может применяться формула, полученная Л.П. Анисимовым, М.С. Левиным и В.Г. Пекелисом,</p> $k_F = \sqrt{1 + \frac{(1 - k_Z^2)(k_Z - k_P)}{(2 - k_Z - k_P)k_Z^2}} \text{ при } \lambda < 1;$ $k_F = \sqrt{1 + \frac{(1 - k_Z)(k_Z - k_P)^2}{(1 + k_Z - 2k_P)k_Z^2}} \text{ при } \lambda \geq 1,$ <p>где $\lambda = (k_Z - k_P)/(1 - k_Z)$.</p> <p>Определение k_F возможно также на основе выражения, предложенного А.П. Казанцевым,</p> $k_F = \sqrt{1 + \frac{3(1 - k_Z)^2}{4(1 + k_Z)^2}}.$
6	Статистические методы	<p>При использовании статистических методов потери ЭЭ рассчитывают на основе устойчивых статистических зависимостей потерь от обобщенных параметров сети, например, суммарной нагрузки, суммарной длины линий, числа подстанций и т.п.</p>	
7	Расчет потерь в распределительных сетях 6...10 кВ	<p>Сети 6...10 кВ характеризуются относительной простотой схемы замещения каждой линии, большим их количеством и низкой достоверностью информации о нагрузках понижающих трансформаторов. В связи с этим получили распространение методы расчета потерь ЭЭ, основанные на представлении линий 6...10 кВ в виде эквивалентных сопротивлений.</p>	

Нагрузочные потери в линии определяют по одной из следующих формул в зависимости от того, какая информация о нагрузке головного участка имеется – активная W_P и реактивная W_Q энергии, переданные за время T или максимальная токовая нагрузка I_{max} :

$$\Delta W_H = \frac{W_P^2 k_{FP}^2 + W_Q^2 k_{FQ}^2}{U_E^2 T} \cdot R_E \quad \text{или}$$

$$\Delta W_H = 4.1 I_{max}^2 \tau R_E, \quad (1)$$

где k_{FP} и k_{FQ} – коэффициенты формы графиков активной и реактивной мощности; U_E – эквивалентное напряжение сети, учитывающее изменение фактического напряжения, как во времени, так и вдоль линии.

Эквивалентное напряжение определяют по эмпирической формуле

$$U_E = \sqrt{k_1 U_1^2 + (1 - k_1) U_2^2}, R_E,$$

где U_1 и U_2 – напряжения в начале линии в режимах наибольших и наименьших нагрузок; $k_1 = 0.9$ для сетей 6...10 кВ и 0.8 для сетей 35 кВ.

Если регистрируется только график активной нагрузки, формула (1) преобразуется к виду

$$\Delta W_H = \frac{W_P^2 + W_Q^2}{U_E^2 T} \cdot k_F^2 R_E.$$

Эквивалентное сопротивление линии 6...10 кВ при неизвестных нагрузках элементов определяют на основе допущения одинаковой загрузки понизительных трансформаторов (ПТ):

$$R_E = \frac{\sum_{i=1}^n S_{Ti}^2 R_{Li} + \sum_{j=1}^m S_{Tj}^2 R_{Tj}}{S_{TS}} = R_E^L + R_E^T,$$

где S_{Ti} – суммарная номинальная мощность ПТ, получающих питание по i -му участку линии сопротивлением R_{Li} ; n – число участков линий; S_{Tj} – номинальная мощность j -го ПТ с сопротивлением R_{Tj} ; m – число ПТ; S_{TS} – суммарная мощность ПТ, присоединенных к рассматриваемой линии.

Потери холостого хода в трансформаторе или шунтирующем реакторе определяют по формуле

$$\Delta W_X = \Delta P_X T \left(\frac{U_C}{U_{НОМ}} \right)^2,$$

где ΔP_X – номинальное значение потерь холостого хода оборудования; $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение; U_C – среднее значение фактического напряжения.

2.2. Разработка виртуального прибора для исследования теплового режима работы и потерь мощности в токоведущих элементах сети

Теплота, выделяющаяся в токопроводе при протекании по нему тока I , пропорциональна потерям активной мощности. График $\vartheta(t)$, характеризующий изменение во времени температуры перегрева токопровода относительно окружающей среды, используется в расчетах нагрузки для оценки эффекта его нагрева. Этот график является результатом интегрирования в общем случае довольно сложного нелинейного дифференциального уравнения [53,с224].

Приближенное уравнение для определения $\vartheta(t)$ представляется выражением [54,с.264]:

$$\tau \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = \vartheta_{ж.н} \left(\frac{I}{I_H} \right)^2, \quad (2.2.1)$$

где τ – реальная постоянная нагрева токопроводов; ϑ – температура перегрева токопровода; $\vartheta_{ж.н}$ – максимально допустимая температура жил; I – ток нагрузки; I_H – длительно допустимый ток токопровода.

В этом уравнении не учтены зависимости сопротивления и постоянного нагрева токопровода от температуры.

Более точное уравнение, учитывающее выше отмеченные зависимости, имеет вид [55,с.288]:

$$\tau(\vartheta) \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = K_R(\vartheta) \vartheta_{ж.н} \left(\frac{I}{I_H} \right)^2, \quad (2.2.2)$$

где

$$\tau(\vartheta) = \frac{\tau_0}{1 + 0,3 \left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{ж.н}} \right)}; \quad (2.2.3)$$

τ_0 – значение постоянной нагрева при длительно допустимой температуре жил $\vartheta_{ж.н}$;

$$K_R(\vartheta) = 1 + \alpha \cdot \vartheta; \quad (2.2.4)$$

α – температурный коэффициент сопротивления токопровода.

Уравнение (2.2.2), являющееся нелинейным дифференциальным уравнением нагрева, не имеет аналитического решения.

В [56,с.30, 57,с.14] разработан специальный автомат для выбора токоведущего элемента системы электроснабжения по нагреву, который методом конечных приращений интегрирует уравнение (2.2.2). Автомат представляет собой физическое устройство состоящих из множества различных функциональных подсистем, имеющий тенденцию со временем физически и морально устаревать.

В настоящее время компьютерное моделирование стало основным инструментом различного рода исследований, который позволяет просчитать различные режимы работы электротехнического устройства и дает возможность учитывать сколь угодно большое количество факторов, обеспечивая тем самым полный контроль влияния всех входных параметров на результат, что не всегда возможно реализовать с помощью автомата. Учитывая вышесказанное, в данном разделе работы поставлена задача: на основе *технологии ВП* разработать в среде LabVIEW виртуальный инструмент для численного интегрирования дифференциального уравнения перегрева (2.2.2) жил ткопроводов относительно температуры окружающей среды, позволяющий произвести выбор токоведущих элементов по нагреву [61,с.11]. При этом LabVIEW-программа в комплексе с соответствующими аппаратными средствами позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности.

В результате программирования в LabVIEW получаем ВП. Разработанные приборы могут состоять из ВП более низких уровней, так называемых виртуальных подприборов (ВПП), которые являются аналогами функций (подпрограмм) в текстовых языках программирования. Далее, для удобства, виртуальный прибор будем называть просто «прибором». Разработка прибора реализуется на основе двух панелей. На первой панели, называемой передней или лицевой, проектируется интерфейс пользователя, состоящий из элементов управления прибором (кнопки, переключатели, выпадающие списки) и

элементов отображения данных (осциллографы, стрелочные и цифровые индикаторы). На второй панели, называемой блок-диаграммой, создается сама программа, представленная графически, и связанными между собой проводниками (нитьями), по которым происходит передача данных от узла к узлу программы.

Итак, при написании программы - иначе говоря, разработке прибора – действия пользователя сводятся к разработке блок-диаграммы решаемой задачи в среде LabVIEW, содержащей набор необходимых образов библиотечных функций и конструкций традиционных языков программирования. Прибор для совместного расчета температуры перегрева и потерь мощности в элементах сети с учетом качества электроэнергии состоит из нескольких подсистем, каждая из которых в приборе реализована в виде ВПП.

2.2.1. Структурные подсистемы виртуального прибора

Порядок действий при решении задачи расчета температуры перегрева токопроводящего элемента (провода), выбор его сечения и потерь мощности в нем с учетом качества электроэнергии представлен на рисунке 2.2.1.1.

В блоке-1 (ВПП-1) осуществляется моделирование графика электрической нагрузки от группы электроприемников (ЭП) с учетом качества электроэнергии. Исходными данными являются вероятностные

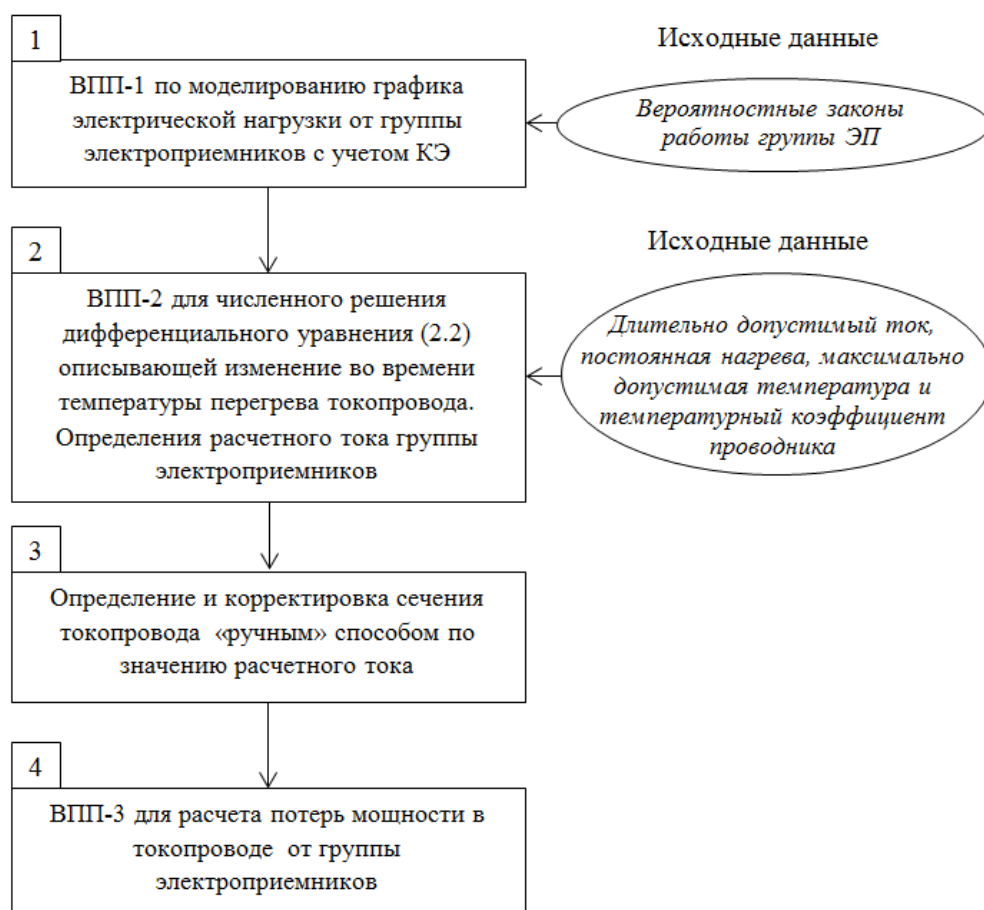


Рисунок 2.2.1.1 - Последовательность расчета температуры перегрева провода, выбор его сечения и расчет потерь мощности

законы работы ЭП. Далее результаты моделирования подаются на вход блока 2 (ВПП-2), где производится численное интегрирование нелинейного дифференциального уравнения (2.2.2). В результате получаем функцию изменения во времени температуры перегрева токопровода относительно окружающей среды и определяется расчетный ток от группы электроприемников. Далее (блок 3): по значению расчетного тока исследователь «ручным» способом определяет и при необходимости корректирует сечение токопровода. В последнем блоке 4 (ВПП-3) рассчитываются потери мощности в токопроводе по скорректированному значению сечения токопровода.

Для выполнения задачи блока 1 рисунок 2.2.1, сначала ознакомимся с идеологией разработки имитационной модели на примере моделирования

графика электрической нагрузки от группы электроприемников. Далее разработаем ВПП – 1 в программной среде LabVIEW.

Имитационные модели (ИМ) [64], в зависимости от природы случайных факторов, позволяют исследовать поведение различных систем с учетом влияния случайных событий, случайных величин (дискретные или непрерывные) или случайных функций (процессов).

Если в ИМ моделируются достаточно сложные системы, то их функционирование может быть связано с возникновением нескольких типов событий и учетом большого числа случайных величин, распределенных по различным законам.

Для моделирования всех случайных факторов, связанных с решаемой задачей, нельзя использовать один датчик, генерирующий одну «общую» последовательность случайных чисел, так как с математической точки зрения нельзя их считать независимыми. Поэтому при моделировании каждого случайного фактора исследователи используют отдельный генератор или генерируют новые последовательности случайных чисел.

Разработчику ИМ должно быть известно, что при планировании проведения модельных экспериментов необходимо соотносить между собой три представления времени: 1) реальное, в котором происходит функционирование имитируемой системы; 2) модельное, в масштабе которого организуется работа модели; 3) машинное, отражающее затраты времени ЭВМ на проведение имитации. Механизм модельного времени позволяет решать следующие задачи: - отображать переход моделируемой системы из одного состояния в другое; синхронизировать работы компонент модели; - воздействовать на масштаб времени «жизни» (функционирования) исследуемой системы; - производить управление ходом модельного эксперимента; - реализовать моделирование квазипараллельных событий в модели. В последнем пункте приставка «квази» отражает последовательный характер обработки событий (процессов) в ИМ, которые в реальной системе возникают (протекают) одновременно. Существуют два основных подхода к продвижению

модельного времени: 1) продвижение времени от события к событию; 2) продвижение времени с постоянным шагом. Первый подход используется всеми основными имитационными программами, а второй является разновидностью первого и используется в имитационных (дискретно-событийных) моделях.

2.2.2. Разработка виртуального прибора и его подсистем в программной среде LabVIEW

Как было отмечено выше, разработка прибора в программной среде LabVIEW реализуется на основе двух панелей.

На передней панели, состоящей из элементов управления прибором и элементов отображения данных на рисунке 2.2.2.1, спроектирован интерфейс пользователя ВП, предназначенный для исследования теплового режима и выбора токоведущих элементов по нагреву.

На блок-диаграмме (вторая панель) создана сама программа, представленная графически, и связанные между собой проводники (нити), по которым передаются данные от узла к узлу программы. В блок-диаграмме закладывается алгоритм работы ВП, ВПП и последовательность производимых операций. Используемые при разработке ВПП-1 элементы языка LabVIEW (константы, функции, подприборы и структуры) показаны ниже в табл. 2.2.2.1 – 2.2.2.4.

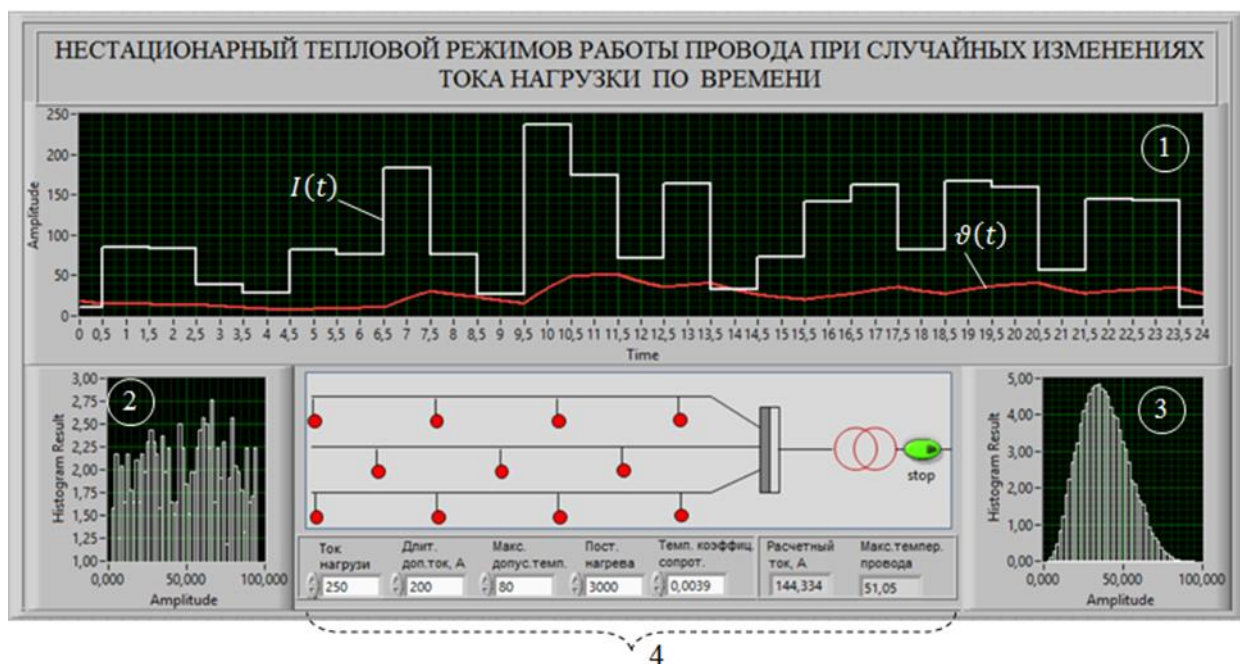


Рисунок 2.2.2.1 - Передняя панель ВП по исследованию теплового режима и выбора токоведущих элементов по нагреву

На рисунке 2.2.2.1 представлена передняя панель ВП с графическими индикаторами (1, 2, 3), элементами управления (4).

1 – имитирует работу осциллографа, где белым цветом отображена временная зависимость смоделированного группового графика электрических нагрузок $I(t)$, красным цветом - тепловой режим работы проводника, представляющий временную зависимость его температуры. 2 – гистограмма группового графика электрических нагрузок $I(t)$. 3 – гистограмма зависимости температуры проводника от времени $\vartheta_{пр}(t)$. 4 – цифровые элементы управления для ввода исходных данных моделирования. Кнопка «Stop» для пуска/останова ВП. Цифровые индикаторы для отображения результатов моделирования.

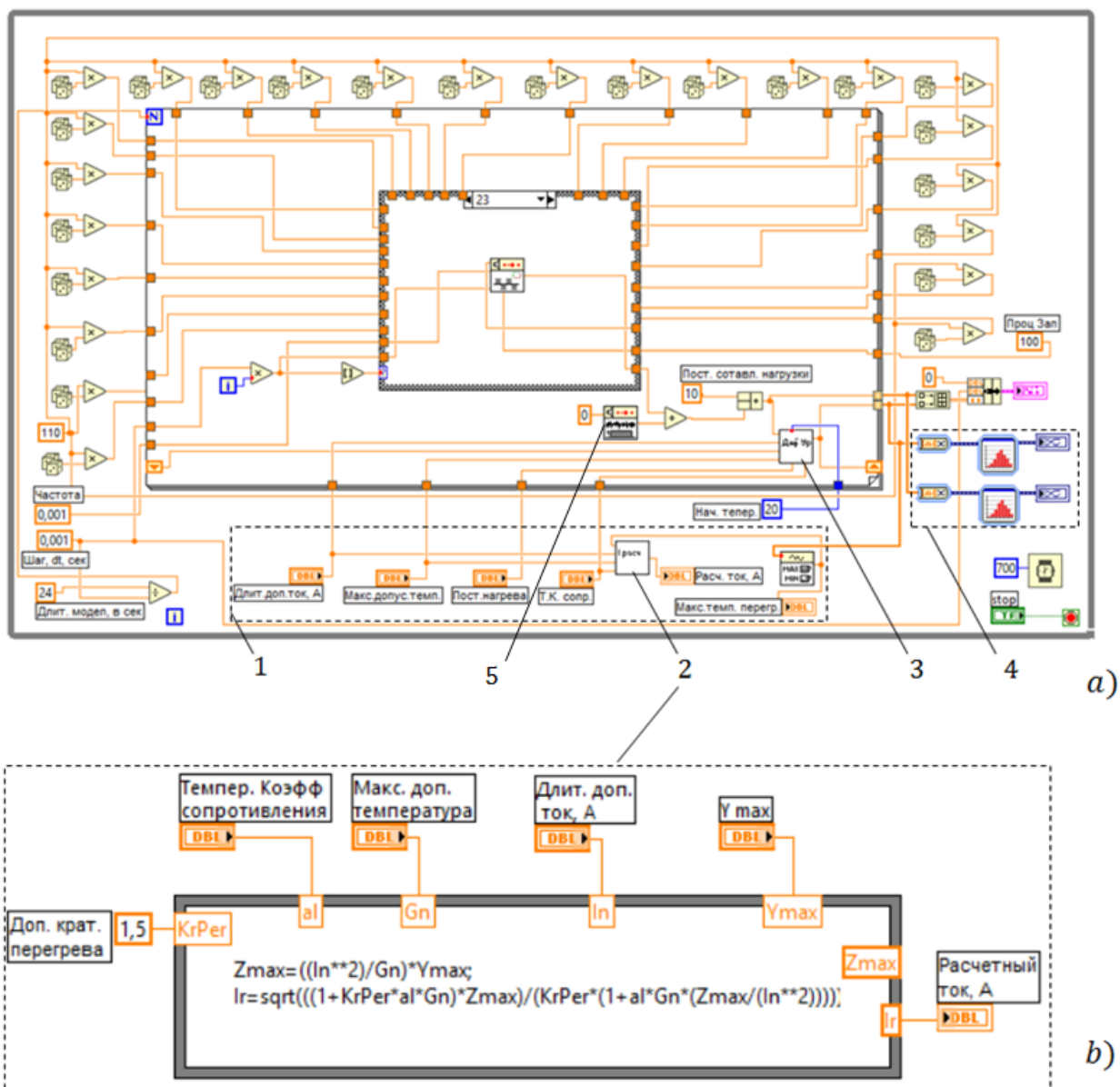


Рисунок 2.2.2.2 - а) – блок-диаграмма ВП по исследованию теплового режима работы токоведущих элементов; б) – ВПП определения расчетного тока

В блок-диаграмме (рисунок 2.2.2.2, а) алгоритм функционирования ВП реализован с помощью подпрограмм (подприборов), пронумерованных цифрами 1, 2, 3, 4. Вся оставшаяся пронумерованная область блок-диаграммы соответствует ВПП-1 (подпрограмма моделирования группового графика нагрузки), передняя панель и блок-схема которого показаны на рисунках 2.2.2.1 и 2.2.2.2. С помощью функции, пронумерованной цифрой 5, можно воздействовать на смоделированный график нагрузки с целью воздействия на качество ЭЭ. На участках 1-3 реализованы функциональные

возможности ВПП-2 (рисунок 2.2.2.1), выполняющего операцию численного интегрирования нелинейного дифференциального уравнения (НДУ) (2.2.2), определение расчетного тока от группы ЭП. При этом непосредственное численное интегрирование производится в ВПП, (цифра 3), передняя панель и блок-схема которого представлены на рисунках 2.2.2.1 и 2.2.2., а определение расчетного тока в - 2, блок схема которого показана на (рис.2.2.2.2 b).

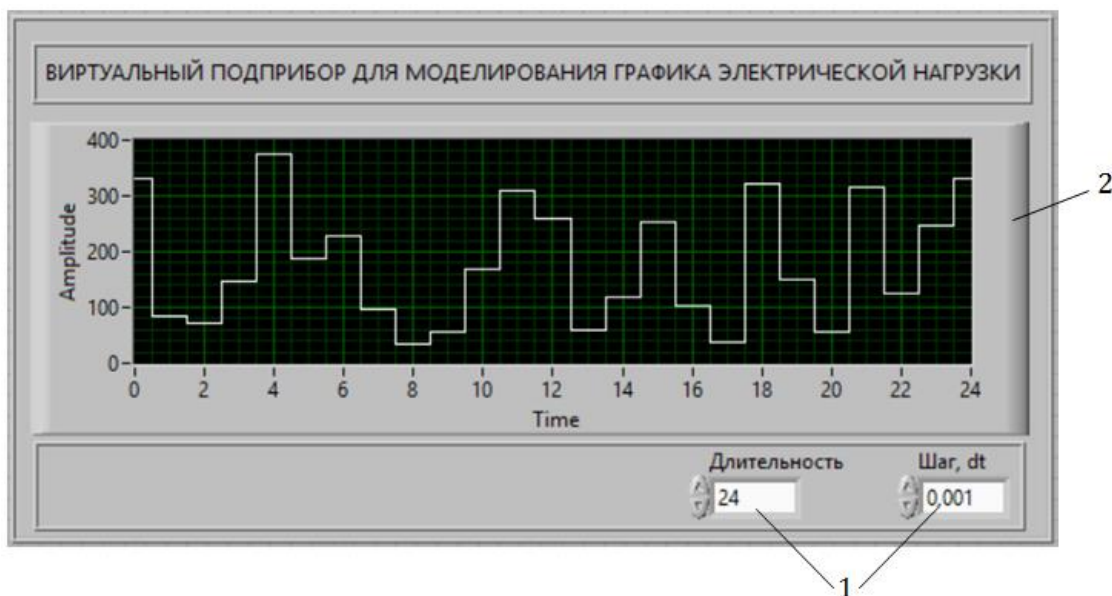


Рисунок 2.2.2.3 - Передняя панель ВПП-1

На рисунке 2.2.2.3 представлена передняя панель ВПП-1, где 1 – управляющие элементы прибора для ввода длительности моделирования ($T = 24$) и значения шага моделирования ($dt = 0.001$) модельного времени; 2 – графический индикатор, имитирующий работу осциллографа, а блок-диаграмма этой подпрограммы изображена на рисунке 2.2.4.

Длительность времени, равная $T = 24$ модельного времени, выбрана из соображения исследований режимов работы ЭП в течение суток, когда цикличность производственных процессов равна одним суткам.

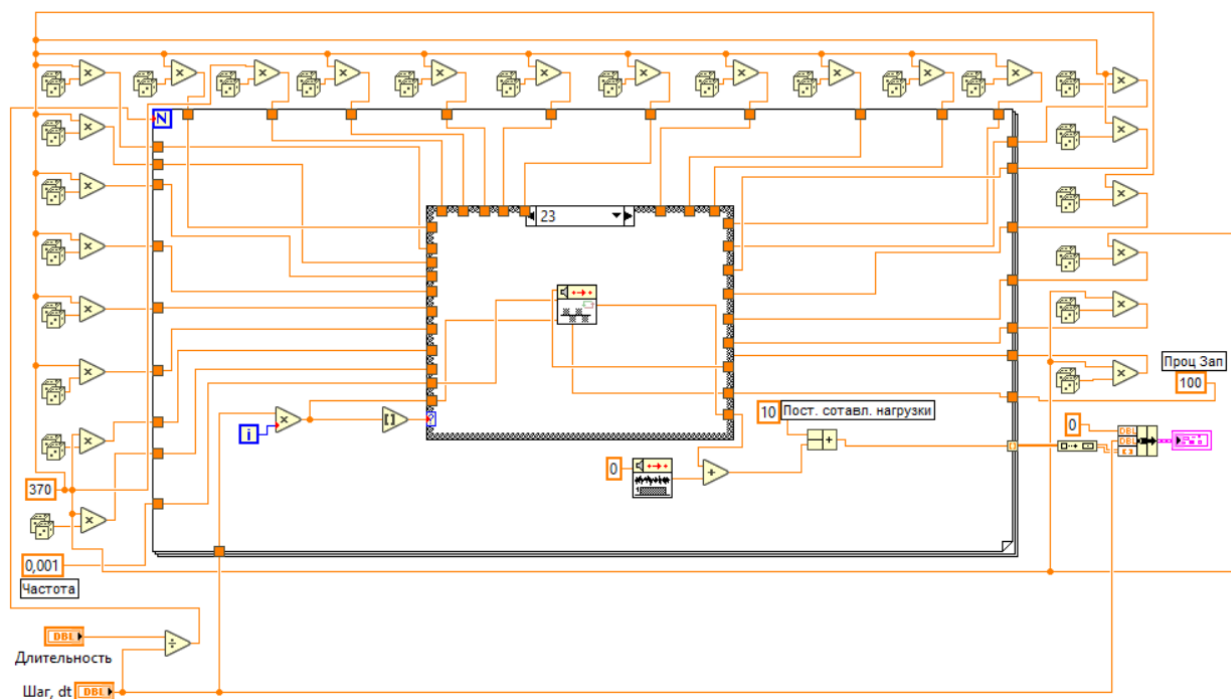


Рисунок 2.2.2.4 - Блок-диаграмма ВПП-1

Таблица 2.2.2.1. - Структуры, подприборы, функции и константы ВПП-1

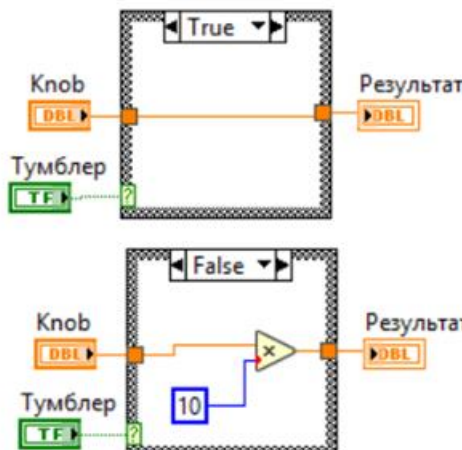
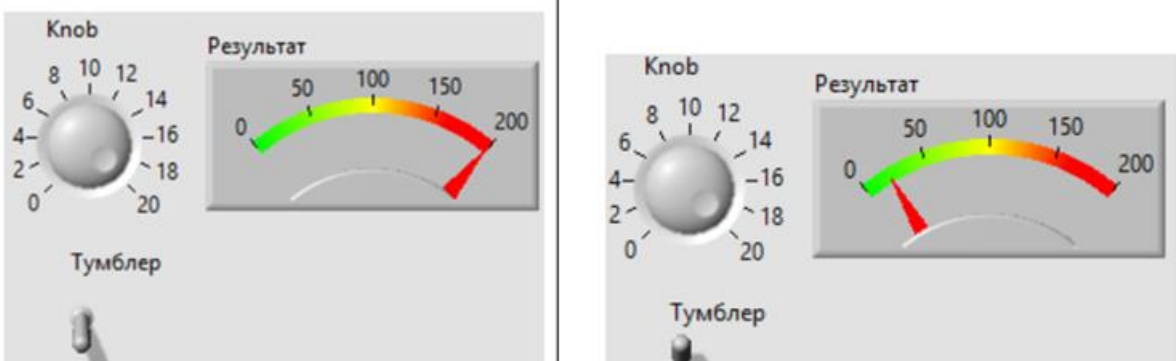
Цикл For Loop	Комментарий
<p>Цикл с фиксированным числом итераций (For Loop) осуществляет заданное число итераций выполнения кода внутри данной структуры.</p> <p>Программный код выполняется внутри рамки, которая и определяет тело цикла. Константа N – заданное число итераций цикла, i – номер текущей итерации. В примере требуется выполнить 100 повторений (итераций) цикла. Первое значение счетчика всегда нулевое. По завершении цикла оно будет, соответственно, 99.</p>	<p>Моделируем в цикле For Loops 100 случайных чисел, равномерно распределенных в интервале [0,10]. Для этого внутри цикла вносим иконку Random Number (0-1)), генерирующее текущее случайное число из интервала (0-1) умножаем на константу, равную 10. По окончании моделирования формируется массив 100 случайных чисел, который выводится за пределы цикла через границы рамочной структуры (For Loops) и передается на средства визуализации. В этом случае говорят, что выводится массив через «туннель».</p>
<p>Туннели. Константы или начальные значения переменных программы часто необходимо передавать внутрь тела цикла. Вычисленные в цикле данные, наоборот, необходимо выводить за пределы цикла и передавать на средства визуализации. В</p>	

обоих случаях данные требуется передавать через границы рамочных структур типа: «For Loops» В программах LabVIEW в подобных ситуациях применяются «туннели». Туннель от источника данных создается автоматически, если соединить проводником источник с границей цикла. В программах «туннель» имеет вид квадратика на границе цикла.

Автоиндексация. В программах часто требуется последовательно выбирать из массива данные для обработки внутри цикла или накапливать в массиве вычисленные в цикле данные и затем передавать их для дальнейших операций. Для этой цели необходимо использовать автоиндексацию данных. Для цикла «For Loops» автоиндексирование данных включено по умолчанию.

В этом приборе индикатор «Последнее число» покажет только последний результат выполнения операций в цикле (автоматическая индексация отключена). Пара квадратных скобок (обозначение массива данных аналогично, как и в языке Си) есть индикатор того, что в цикле используется режим автоиндексации.

Таблица 2.2.2.2.

Case Structure (структура с выбором)	Комментарий
 <p>При установке структуры Case по умолчанию устанавливаются сразу две страницы – True и False (истина и ложь), которые переключаются между собой стрелками вверху рамки.</p> 	<p>Реализация даже элементарных алгоритмов, как правило, не обходится без операций логического ветвления программы в зависимости от определенных условий. Для этих целей используются так называемые Case структуры. Такие структуры позволяют осуществлять выбор по условию или по значению параметра селектора и переходить на выполнение соответствующих действий.</p> <p>Для пояснения логики работы «структуры с выбором», рассмотрим элементарную программу, которая позволит, в зависимости от положения тумблера, получать различный результат вычислений. Если тумблер находится в выключенном состоянии, то значение входного параметра будет умножаться на 10, а в противном случае меняться не будет.</p>

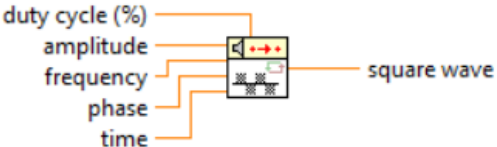
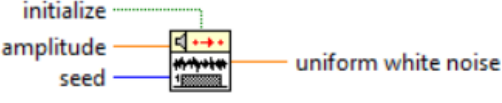
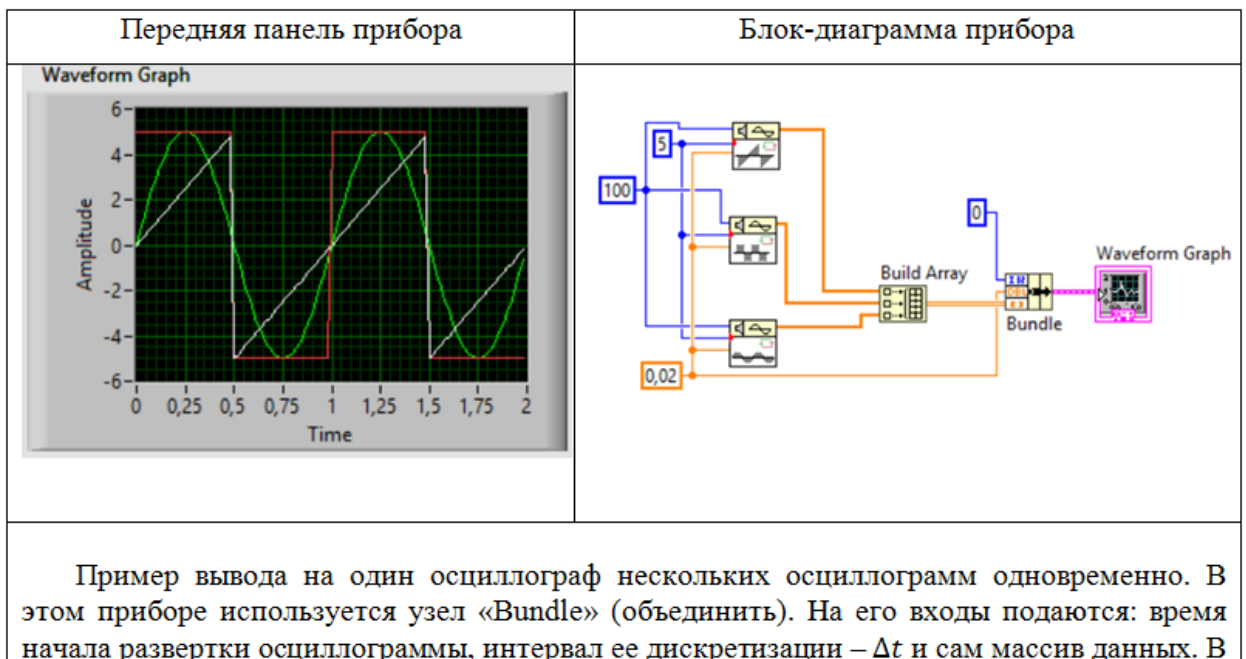
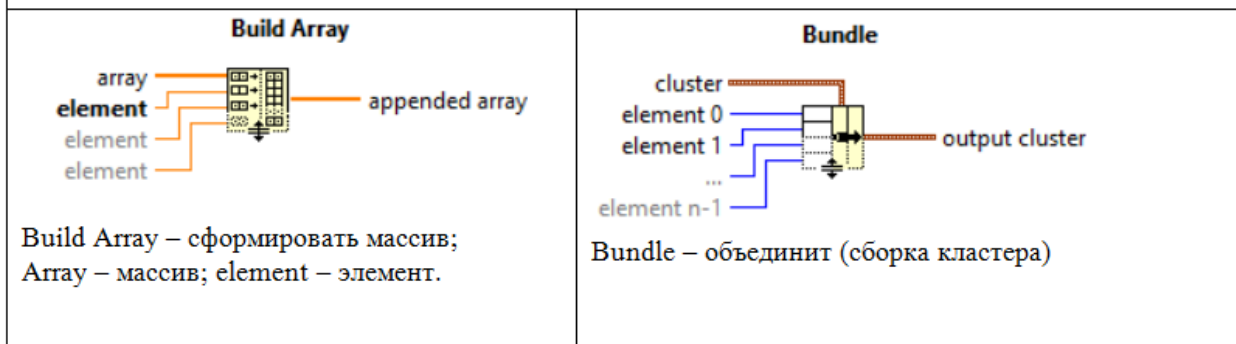
ВП для генерации прямоугольного колебания (Square Wave PtByPt)	Комментарий
 <p>Duty cycle – заполнение цикла (%); amplitude – амплитуда; frequency – частота; phase – фаза; time – время; square wave – прямоугольное колебание.</p>	<p>Все функции для генерации сигналов можно разделить на две категории: функции, выходом которых является массив значений, и функции, выходом которых является единственное число. Все такие функции имеют суффикс «PtByPt» (точка за точкой) и потому могут использоваться в циклах.</p>
<p>Заполнение цикла (%) определяет время (в процентах от периода), в течение которого прямоугольный сигнал имеет высокий уровень. Значение по умолчанию для этого входа равно 50%.</p>	
ВП для генерации равномерного белого шума (Uniform White Noise PtByPt)	Комментарий
 <p>Amplitude – амплитуда; Seed – начальное значение; Uniform white noise – равномерный белый шум.</p>	<p>ВП генерирует псевдослучайный белый шум с равномерным законом амплитудного распределения, значения которого находятся в диапазоне $[-a;a]$, где a представляет абсолютное значение амплитуды.</p>

Таблица 2.2.2.3. - Пример использования подпрограммы «Build Array» (создать массив) и функции «Bundle» (объединить)



приборе также используется подпрограмма «Build Array» (создать массив). На входы подпрограммы передаются массивы отсчетов отдельных сигналов, полученных со стандартных генераторов LabVIEW. Данные из сформированного многомерного массива передаются в узел «Bundle», в котором формируется кластер исходных данных (начало отсчета по оси времени и шаг для построения графиков).



ВПП-2 для численного решения дифференциального уравнения (2.2.2), описывающего изменения во времени температуры перегрева токопровода.

Приведенных в таблице 2.2.2.1 - 2.2.2.4 описаний структур, подприборов, функций, а также примеров их использования, по нашему мнению будет достаточно, чтобы понять работу ВПП – 2 и ВПП – 3, описание которых приводятся ниже.

2.2.3. Разработка ВПП – 2 для численного решения ДУ и определения расчетного тока группы ЭП определяющие потери мощности в сети

Для удобства построения структурной схемы модели, а затем разработки ВПП-2, описывающего перегрев проводника относительно окружающей среды, выполним некоторые математические преобразования уравнения (2.2.2) [61,с.11]. Решив (2.2.2) относительно производной, получим:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{K_R(\vartheta)}{\tau(\vartheta)} \cdot \vartheta_{ж.н} \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 - \frac{1}{\tau(\vartheta)} \cdot \vartheta. \quad (2.2.3.1)$$

Используя выражения (2.2.3) и (2.2.4), преобразуем коэффициенты в правой части уравнения (2.2.3.1):

$$\begin{aligned}
\frac{K_R(\vartheta)}{\tau(\vartheta)} &= \frac{(1 + \alpha \cdot \vartheta)}{\tau_0} = \frac{(1 + \alpha \cdot \vartheta) \left[1 + 0,3 \left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{\text{ж.н.}}} \right) \right]}{\tau_0} = \\
&= \frac{1,3 + 1,3 \cdot \alpha \cdot \vartheta - 0,3 \cdot \frac{\vartheta}{\vartheta_{\text{ж.н.}}} - 0,3 \cdot \alpha \cdot \frac{\vartheta^2}{\vartheta_{\text{ж.н.}}}}{\tau_0} = \\
&= \frac{1,3}{\tau_0} + \frac{1,3 \cdot \alpha \cdot \vartheta}{\tau_0} - \frac{0,3}{\tau_0} \cdot \frac{\vartheta}{\vartheta_{\text{ж.н.}}} - \frac{0,3 \cdot \alpha}{\tau_0} \cdot \frac{\vartheta^2}{\vartheta_{\text{ж.н.}}}; \tag{2.2.3.2}
\end{aligned}$$

$$\frac{1}{\tau(\vartheta)} \cdot \vartheta = \frac{1 + 0,3 \left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{\text{ж.н.}}} \right)}{\tau_0} \cdot \vartheta = \frac{1,3 \cdot \vartheta - 0,3 \cdot \frac{\vartheta^2}{\vartheta_{\text{ж.н.}}}}{\tau_0}. \tag{2.2.3.3}$$

Подставив (2.2.3.2) и (2.2.3.3) в (2.2.3.1) и выполнив необходимые математические операции получим:

$$\begin{aligned}
\frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{1,3}{\tau_0} \cdot \vartheta_{\text{ж.н.}} \cdot \left(\frac{I}{I_{\text{н}}} \right)^2 + \left[\left(\frac{1,3}{\tau_0} \cdot \vartheta_{\text{ж.н.}} \cdot \alpha - \frac{0,3}{\tau_0} \right) \cdot \left(\frac{I}{I_{\text{н}}} \right)^2 - \frac{1,3}{\tau_0} \right] \cdot \vartheta - \\
&- \left[\frac{0,3}{\tau_0} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_{\text{н}}} \right)^2 + \frac{0,3}{\tau_0} \cdot \frac{1}{\vartheta_{\text{ж.н.}}} \right] \cdot \vartheta^2. \tag{2.2.3.4}
\end{aligned}$$

После введения в (2.2.3.4) введем следующих обозначений:

$$\frac{1,3}{\tau_0} \cdot \vartheta_{\text{ж.н.}} = k_1, \quad \frac{0,3}{\tau_0} = k_2, \quad \frac{1,3}{\tau_0} = k_3$$

получим нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = k_1 \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 + \left[(k_1 \cdot \alpha - k_2) \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 - k_3 \right] \cdot \vartheta - \left[k_2 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 + k_2 \cdot \frac{1}{\vartheta_{ж.н.}} \right] \cdot \vartheta^2. \quad (2.2.3.5)$$

Раскрыв скобки, получим выражение, удобное для построения в среде LabVIEW виртуального прибора:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = k_1 \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 + k_1 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 \cdot \vartheta - k_2 \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 \cdot \vartheta - k_3 \cdot \vartheta - k_2 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 \cdot \vartheta^2 - k_2 \cdot \frac{1}{\vartheta_{ж.н.}} \cdot \vartheta^2. \quad (2.2.3.6)$$

Динамические системы любой природы в LabVIEW моделируются аналогично моделированию систем на аналоговых вычислительных машинах (АВМ), выполненных на операционных усилителях. В таких машинах перед моделированием вначале разрабатывалась электрическая модель системы в виде структурной схемы. В LabVIEW аналогом такой структурной схемы, по существу, является блок-диаграмма виртуального прибора.

Основными элементами структурных схем на АВМ являются: интеграторы, блоки умножения и сумматоры, условные обозначения которых и соответствующая им реализация с помощью подпрограмм LabVIEW приведены в таблице 2.2.3.1.

Блок-диаграмма прибора LabVIEW для решения уравнения (2.2.3.6) состоит из узлов суммирования, умножения, деления, возведения в квадрат и интегратора (рисунок 2.2.3.1). Перечисленные узлы расположены в правом столбце таблицы 2.2.3.1.

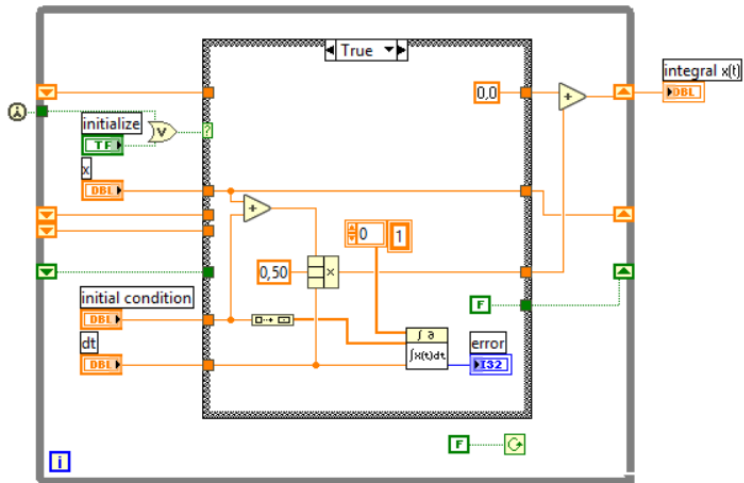


Рисунок 2.2.3.1 - Блок-диаграмма библиотечной функции «Integral x(t) PtByPt».

Таблица 2.2.3.1. - Обозначения элементов структурных схем

Обозначение на структурной схеме вычислительной операции	Реализация в LabVIEW
$\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \int \rightarrow x(t)$ <p>Блок интегрирования</p>	<p>NI_PtbyPt.lvlib:Integral x(t) PtByPt.vi</p> <p>Performs the discrete integration on x. You must sample x at regular intervals of dt.</p> <p>(Блок-диаграмма представлена на рис.2.8)</p>
<p>Блок умножения, деления, возведения в квадрат</p>	<p>Multiply</p> <p>Square</p> <p>Divide</p>



В разрабатываемом приборе использована подпрограмма «Integral x(t) PtByPt» – $\int_{x(t)} dt \cdot 2.8$), где основным узлом, выполняющим операцию численного интегрирования, является функция $\text{integral } x(t)$ -

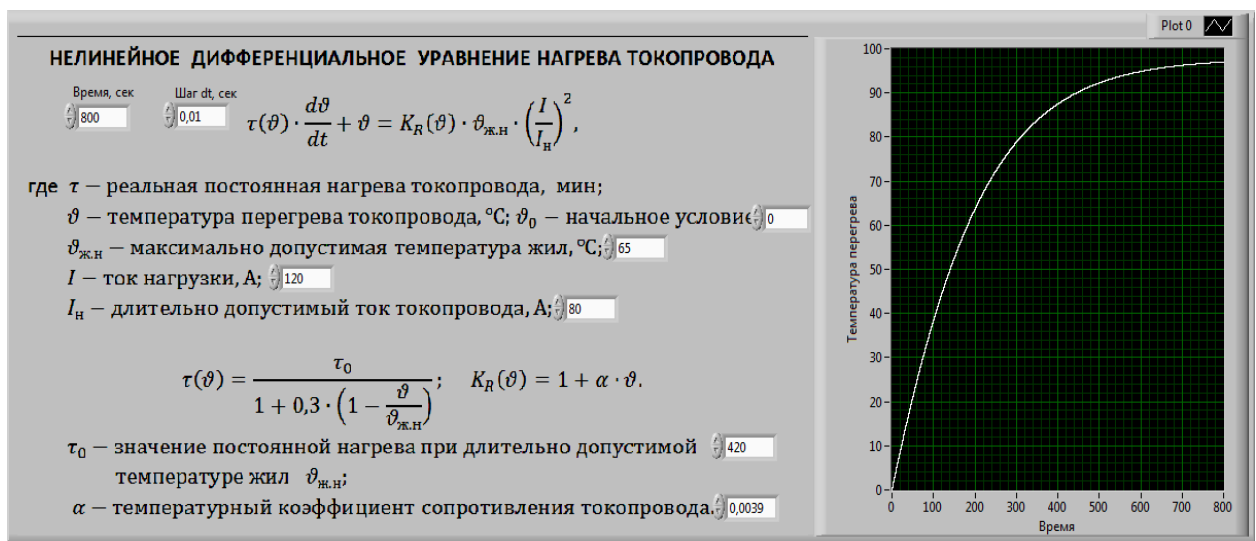


Рисунок 2.2.3.2 - Передняя панель ВПП – 2

Рассмотренный метод обеспечивает возможность исследования выходной величины $\vartheta(t)$ – температуры перегрева токопровода от времени. Передняя панель и блок-диаграмма прибора, представленные соответственно на рисунках 2.2.3.2 и 2.2.3.3, предназначены для численного интегрирования неоднородного нелинейного дифференциального уравнения.

С передней панели ВПП – 2, для численного решения НДУ нагрева токопровода, вводятся следующие исходные данные: τ – реальная постоянная нагрева токопроводов; $\vartheta_{ж.н}$ – максимально допустимая температура жил; I – неизменное значение тока нагрузки; I_H – длительно допустимый ток

токопровода; τ_0 – значение постоянной нагрева при длительно допустимой температуре жил $\vartheta_{ж.н}$; α – температурный коэффициент сопротивления токопровода. Кроме того, задаются длительность и шаг (dt) моделирования в масштабах модельного времени.

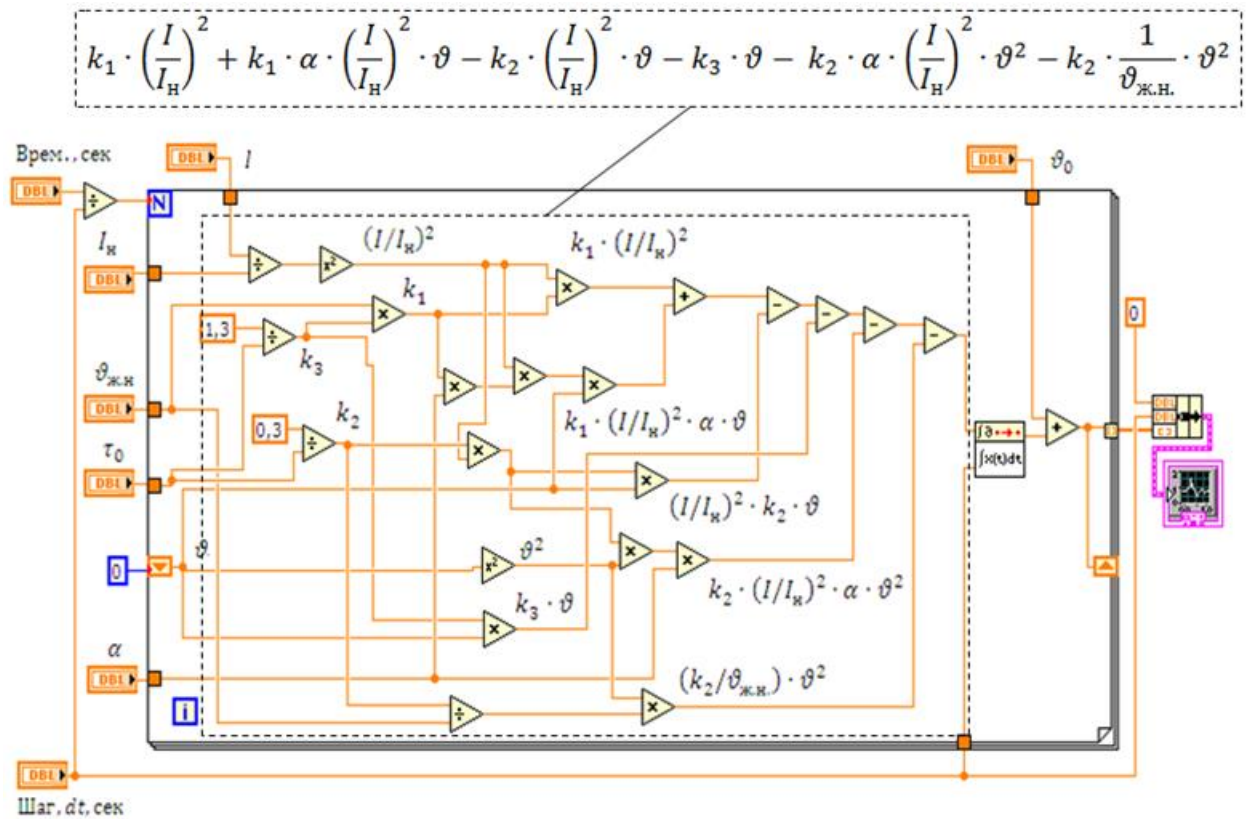

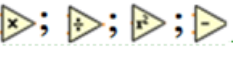


Рисунок 2.2.3.3- Блок – диаграмма ВПП - 2

В блок-диаграмме (рисунок 2.2.3.3) для вычисления интеграла присутствует петля обратной связи, при этом для организации вычислительной процедуры используются сдвиговые регистры.

Сдвиговые регистры («Shift Registers») используются в циклах для передачи значения из предыдущей итерации цикла в следующую. Сдвиговый регистр можно поместить в цикл, нажав правую кнопку мыши на его границе и в контекстном меню выбрать «Add Shift Register». При этом они появятся в виде пары терминалов и будет иметь такой вид - .

Внутри цикла, в блок – диаграмме ВПП -2 (рисунок 2.2.3.3), в пределах участка, выделенного пунктирными линиями, с использованием числовых функций  формируется математическое выражение,

представляющее правую часть ДНУ (2.2.3.6):

$$k_1 \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 + k_1 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right) \cdot \vartheta - k_2 \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 \cdot \vartheta - k_3 \cdot \vartheta - k_2 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right) \cdot \vartheta^2 - k_2 \cdot \frac{1}{\vartheta_{ж.н.}} \cdot \vartheta^2$$

Потом сигнал, представляющий это выражение, подается на вход интегратора «Integral x(t) PtByPt». Одновременно на другой его вход подается величина шага интегрирования dt .

На выходе интегратора получаем текущее значения интеграла ДНУ, представляющее значение перегрева токопровода с заданными параметрами по отношению к окружающей среде. Абсолютное значение температуры токопровода получаем после прибавления к выходному сигналу значения температуры окружающей среды ϑ_0 (рисунок 2.2.3.4.).

Вычисление по графику нагрузки расчетного тока по пику температуры [65, с.114].

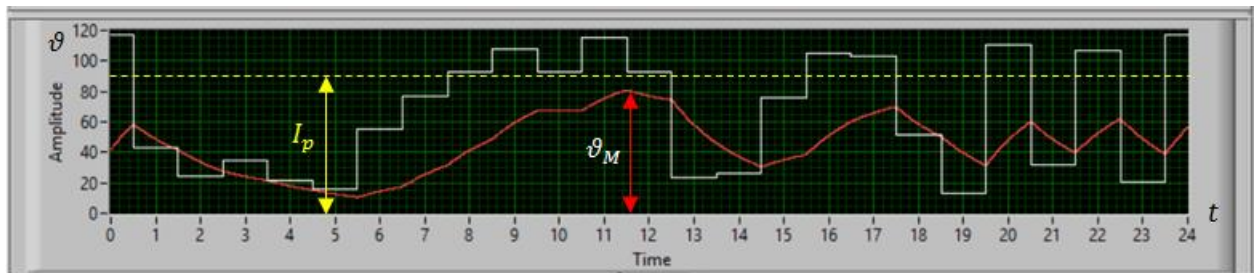


Рисунок 2.2.3.4 - Динамика изменения температуры перегрева проводника $\vartheta(t)$ в соответствии с изменением графика нагрузки $I(t)$

В [54,с.264] отмечено, что если задан график $I(t)$ нагрузки, то удобнее определить расчетный ток I_p , заменив приближенное значение перегрева ϑ_0 в выражении $T_0(d\vartheta_0/dt) + \vartheta_0 = \vartheta_N(I/I_N)^2$ пропорциональным ему вспомогательным переменным z_0 в соответствии с выражением

$$\vartheta_0 = z_0 \frac{\vartheta_N}{I_N^2}. \quad (2.2.3.7)$$

В этом случае уравнение $T_0(d\vartheta_0/dt) + \vartheta_0 = \vartheta_N(I/I_N)^2$ примет следующий вид:

$$T_0 \frac{dz_0}{dt} + z_0 = I^2. \quad (2.2.3.8)$$

Проведённое в [65, с.114] исследование показало, что уравнение (2.2.3.8) может быть использовано не только для приближенного определения перегрева рассматриваемого проводника, но и для нахождения расчетного тока I_{pl} по рассматриваемому графику нагрузки $I(t)$.

В уравнении (2.2.3.8), через z_{0M} обозначим наибольшее из всех возможных значений ординат интеграла $z_0(t)$ этого уравнения; тогда, в соответствии с (2.2.3.8), приближенное значение ϑ_{0M} максимума перегрева будет равно

$$\vartheta_{0M} = z_{0M} \frac{\vartheta_N}{I_N^2}. \quad (2.2.3.9)$$

При определении значения расчетного тока I_{pl} , которое может быть получено интегрированием ДУ (2.12), рассмотрим сначала частный случай при

$$I(t) = const = I_{pl}^{(0)}. \quad (2.2.3.10)$$

В этом случае, в соответствии с понятием расчетного тока $I_{pl}^{(0)}$ по пику перегрева, мы должны получить ту же наибольшую ординату z_{0M} , что и при рассматриваемом переменном графике $I(t)$.

Чтобы был понятным смысл вышесказанного, напомним определение *расчётной нагрузки*.

Как известно, в технических документах проводника любой конструкции в зависимости от условий его прокладки указывается лишь неизменная нагрузка I_N , длительно допустимая по условиям его нагрева. В случае же графика переменной нагрузки, прежде чем выбрать сечение проводника, согласно таблице величин I_N , необходимо предварительно

заменить переменный график нагрузки эквивалентным по эффекту нагрева простейшим графиком $I(t) = \text{const} = I_p$, где I_p и есть определяемая расчетная нагрузка для заданного графика.

Поэтому подстановка (2.2.3.8) в (2.2.3.12) дает:

$$z_{0M} = I_{pI}^{(0)2}, \text{ откуда } I_{pI}^{(0)} = \sqrt{z_{0M}}. \quad (2.2.3.11)$$

Равным образом, если z_{1M} есть наибольшая ордината интеграла $z_1(t)$ менее упрощённого уравнения

$$\lambda_1 T_0 \frac{dz_1}{dt} + z_1 = \lambda_1 I^2, \quad \lambda_1 = \frac{1}{1 + \alpha \vartheta_N \left[1 - \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 \right]}$$

то подстановка в него выражения $I(t) = \text{const} = I_{pI}^{(1)}$ после некоторых упрощений приводит к формуле:

$$I_{pI}^{(1)} = \sqrt{\frac{(1 + \alpha \vartheta_N) z_{1M}}{1 + \alpha \vartheta_N \frac{z_{1M}}{I_N^2}}}. \quad (2.2.3.12)$$

Следует отметить, что расчетные формулы (2.2.3.11) и (2.2.3.12) требуют некоторой корректировки. Это связано с тем, что для стандартной шкалы сечений значение токов I_N приводит к установившемуся перегреву, равному $\vartheta_{уст} = \vartheta_N$, тогда как ток I_{pI} соответствует наибольшему перегреву $\vartheta_M = \beta_I \vartheta_N$. Следовательно, определение сечения по величине I_{pI} , согласно шкале величин I_N , требует корректировки этой шкалы на значения токов, отвечающих длительному перегреву, равному ϑ_M .

Однако авторами [54,с.264] предложено оставить стандартную шкалу допустимых нагрузок без изменений, а соответственно снизить значение $I_{pI}^{(0)}$, определяемое из выражения (2.2.3.11). В результате расчетная формула для I_{pI} примет окончательный вид:

$$I_{pI}^{(0)} = \sqrt{\frac{z_{0M}}{\beta_I}}. \quad (2.2.3.12)$$

Такая же корректировка формулы (2.2.3.12) приводит к выражению [54,с.264]

$$I_{pI}^{(1)} = \sqrt{\frac{(1 + \beta_I \alpha \vartheta_N) z_{1M}}{\beta_I \left(1 + \alpha \vartheta_N \frac{z_{1M}}{I_N^2}\right)}}, \quad (2.2.3.13)$$

которое использовано при разработке ВПП по определению расчетного тока.

Корректировка сечения токопровода «ручным» способом, для расчета потерь мощности в нем

В соответствии к рисунку 2.2.3.1, функциональным назначением разрабатываемого ВП является расчет температуры перегрева провода, выбор его сечения и расчет потерь мощности. Расчет потерь мощности в токопроводе от группы электроприемников должен быть реализован в подпрограмме ВПП-3, но для этого необходимо определиться с сечением токопровода, которое зависит от расчетного тока, определяемого в подпрограмме ВПП-2.

Необходимость в корректировке сечения провода возникает при выборе и согласовании с током срабатывания защитного аппарата электропроводки. Как отмечено в [66, с.457], согласование проводников с током срабатывания защитного аппарата (например, предохранителя в цеховой электросети) $I_{пл.вст}$ осуществляется с помощью выражения:

$$I_{пл.вст} \leq \frac{I_{д.доп}}{K_3}, \quad (2.2.3.14)$$

где K_3 – кратность длительно допустимого тока проводника $I_{д,доп}$ к току срабатывания защитного аппарата. Как известно, длительно допустимый ток проводника определяется расчетным током группы электроприемников. В тоже время на значения расчетного тока влияют как показатели работы электроприемников, так и постоянное время нагрева проводника T_0 [67, с.208].

Следовательно, от постоянной времени нагрева проводника зависит и максимально допустимый ток срабатывания защитного аппарата $I_{пл.вст}$.

В указании по расчету электрических нагрузок постоянные времени нагрева элементов электрической сети сгруппированы так, как представлено в табл. 2.2.3.2 [68].

Таблица 2.2.3.2. - Постоянные времени нагрева элементов электрических сетей

Электрические сети напряжением до 1 кВ, питающие распределительные шинопроводы, пункты, сборки, щиты	$T_0 = 10$ мин
Магистральные шинопроводы, вводно-распределительные устройства и цеховые трансформаторы	$T_0 = 2.5$ ч
Кабели напряжением 6 кВ и выше, питающие цеховые трансформаторные подстанции и распределительные устройства	$T_0 \geq 30$ мин

Исследования показали, что постоянная времени нагрева подчиняется более сложным законам. Например, для открыто проложенных проводов с резиновой изоляцией T_0 изменяется в зависимости от сечения проводника по закону, представленному в табл. 2.2.3.3 [69, с.416].

Таблица 2.2.3.3. - Зависимость постоянной времени нагрева провода от его сечения

Сечение, мм ²	6	10	16	25	35	50	70	95	120
Постоянная времени нагрева, мин	3	4,2	5,5	7,2	9	12	15	18,4	21,4

Следовательно, сечение проводника, рассчитанное с помощью подпрограммы ВПП-2, окончательно корректируется после согласования

проводников с током срабатывания защитного аппарата. Затем, вводя это значение в ВП, получаем значение потери мощности в проводнике.

Результаты численного эксперимента при различных значениях постоянной времени нагрева проводника

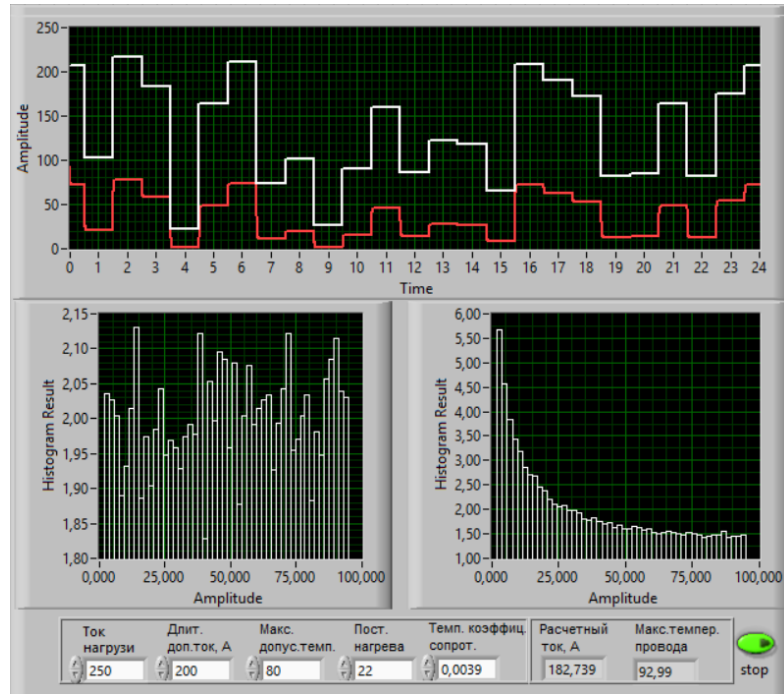


Рисунок 2.2.3.5 - Результат численного эксперимента:
постоянная нагрева проводника равна 22

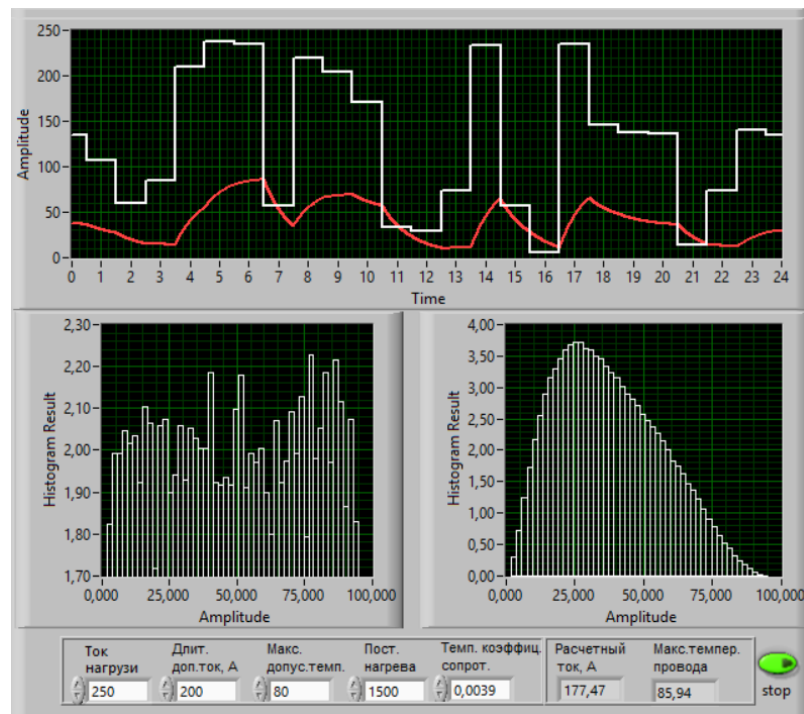


Рисунок 2.2.3.6 - Результат численного эксперимента:
постоянная времени нагрева проводника равна 1500

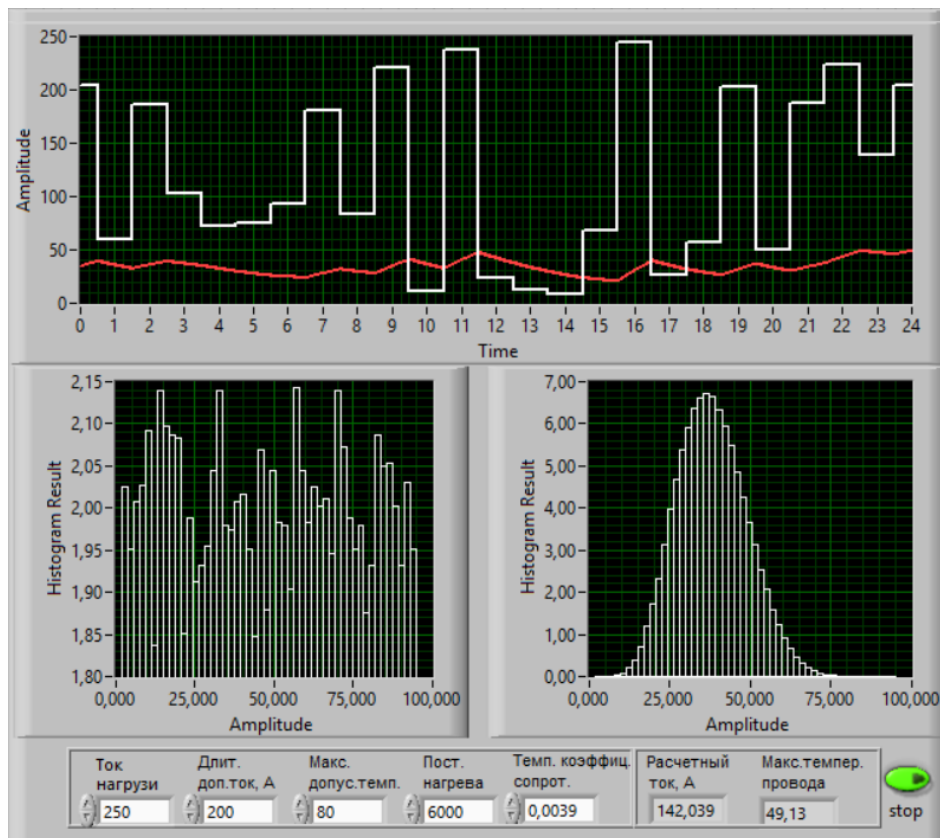


Рисунок 2.2.3.7 - Результат численного эксперимента:
 постоянный нагрев проводника равен 6000

Отметим, что повторяя многократно численный эксперимент при различных значениях постоянного нагрева проводника при неизменных значениях остальных параметров, можно исследовать влияние постоянного нагрева на вероятностный закон изменения температуры нагрева проводника, величину максимального значения перегрева проводника ϑ_M и величину расчетного тока I_p , что важно в проектных работах системы электроснабжения.

Действительно по результатам численного эксперимента можно установить, что при различных значениях постоянного нагрева проводника и неизменности равномерного закона распределения тока нагрузки и при постоянстве остальных параметров моделирования вероятностный закон изменения температуры проводника трансформируется. Например, показательный закон при малом значении постоянного нагрева проводника (рисунок 2.2.3.5), преобразуется в закон Рэля при средних значениях постоянного нагрева (рисунок 2.2.3.6) и далее переходит в закон Гаусса при

больших значениях постоянного нагрева (рисунок 2.2.3.7). Отметим, что в научных публикациях отсутствует такие сведения.

2.3. Расширение функциональной возможности виртуального прибора

Разработанный виртуальный прибор обеспечивает возможность исследования $\vartheta(t)$ – температуры перегрева токопровода от времени только при известных графиках нагрузки $I(t)$ электроприемников (ЭП). Для исследования температуры перегрева токопровода от протекающего по нему реального тока нагрузки $I(t)$ воспользуемся многофункциональным внешним модулем (DAQ модуль - сокращение от *Data Acquisition* = получение данных) для сбора данных типа USB 6009 подключаемым к компьютеру USB-кабелем (рисунок 2.10). Модуль имеет 8 аналоговых входов для измерения напряжения в диапазоне от ± 1 до ± 20 В, 2 аналоговых выхода, 12 комбинированных цифровых входов/выходов и вход счетчика.

Для программирования работы измерительных DAQ-модулей в системе LabVIEW имеется большой набор готовых ВП, выполняющих определенные группы операций по их обслуживанию [83,с.130, 84,с.208].

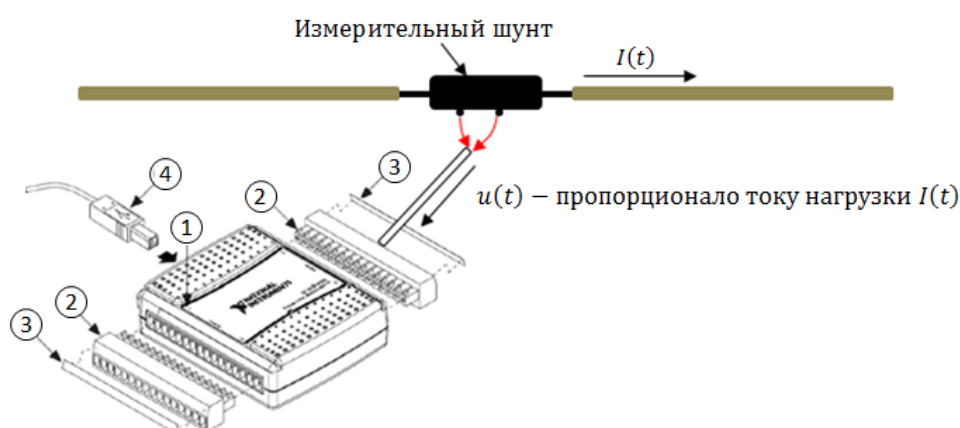


Рисунок 2.3.1. Измерительный модуль USB 6009: 1-DAQ модуль; 2 - клеммные колодки; 3 - этикетки с обозначением сигналов; 4 – USB – кабель

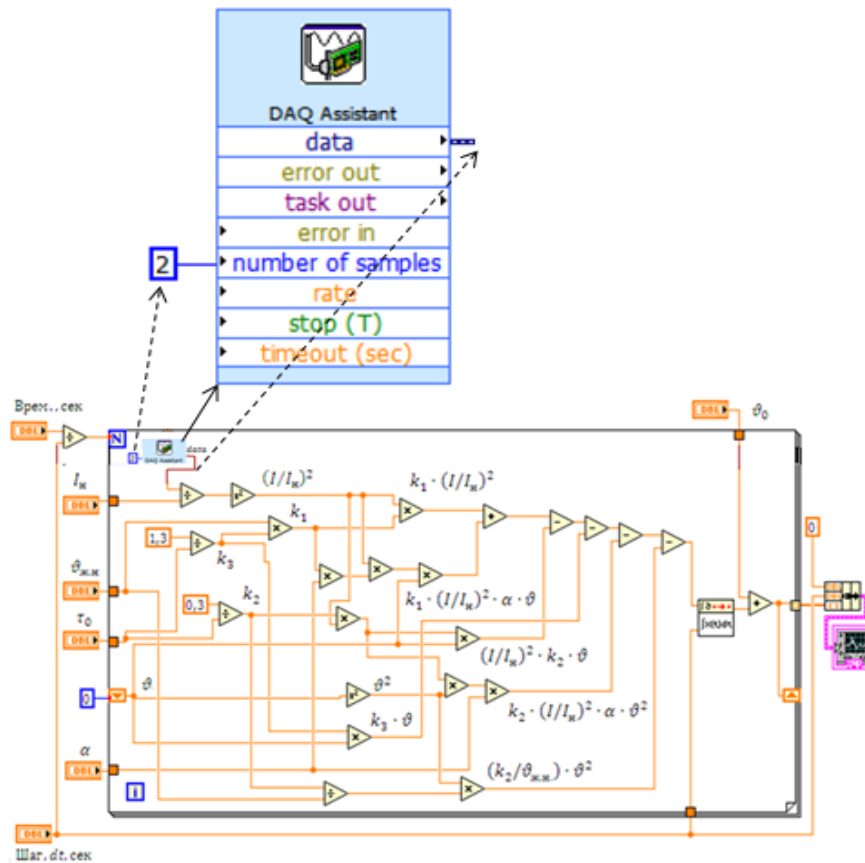


Рисунок 2.3.2. Блок – диаграмма ВП с расширенными функциональными возможностями

Однако стандартные задания, не требующие расширенных возможностей, можно чрезвычайно просто запрограммировать с помощью экспресс-ВП **DAQ Assistant**. Для его запуска нужно щелкнуть мышью по значку **DAQ Assistant** (находится в палитре **Functions >> Express >> Input**), а затем щелкнуть по свободному месту на блок-схеме, куда мы хотим поместить этот узел (рисунок 2.3.2).

Следует отметить, что традиционно для исследователя функции моделирования и экспериментирования разделены. Моделирование осуществляется в среде математических программных пакетов, а эксперименты поддерживаются другими программными средствами, что отнюдь не повышает эффективность исследований. Эффективность использования среды LabVIEW в научных исследованиях состоит в том, что, оставаясь в ее рамках, можно разрабатывать как математическую модель объекта, так и снабжать эту модель

экспериментальными данными с помощью аппаратных средств ввода-вывода, сопряженных с реальным объектом.

Выводы по главе 2

1. Ухудшение качества электроэнергии приводит к возникновению таких «энергетических процессов», для которых в настоящее время нет единой общепринятой теории мощности, которая могла бы использоваться в качестве основы для оценки качества электропитания, определения источников гармонических искажений в системах электроснабжения и их компенсации.

2. Выдвинута гипотеза, что ухудшение КЭ, связанное с несинусоидальными напряжением и током, может повлиять и на расчетные значения электрических нагрузок, вследствие того, что теория электрических нагрузок была разработана для систем электроснабжения без искажений.

3. Учитывая, что расчет электрических нагрузок является первым и основополагающим этапом проектирования любой системы электроснабжения, возникает необходимость в разработке инструментария для проверки выдвинутой гипотезы. С этой целью в программной среде LabVIEW разработаны соответствующие виртуальные приборы.

4. Решена задача по разработки в среде LabVIEW виртуального прибора для численного интегрирования дифференциального уравнения перегрева жил ткопроводов относительно температуры окружающей среды, позволяющего произвести выбор токоведущих элементов по нагреву. При этом LabVIEW-программа в комплексе с соответствующими аппаратными средствами позволяет автоматизировать процесс измерения, контроля потерь. Важнейшими количественными показателями технического состояния электрических сетей и уровня их эксплуатации являются величина потерь электроэнергии и тенденция её изменения.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ СЕТИ С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMPOWERSYSTEMS/SIMULINK И LABVIEW

Общеизвестно, что при передаче электроэнергии от источника к потребителю какая-то часть передаваемой энергии, не доходя до потребителя, рассеивается в пространство в виде тепла. Это происходит в элементах сети, имеющих сопротивление активного характера. Чтобы определить рассеянную часть электроэнергии, необходимо знать величину тока и значение сопротивления, через которое протекает этот ток. При этом предполагается, что значения параметров, по которым оценивается качество электроэнергии, лежат в допустимых пределах и удовлетворяют установленным требованиям. Однако, такое предположение некорректно, и низкое качество электроэнергии влечет за собой неприятные последствия, одним из которых являются дополнительные потери электроэнергии, как в элементах сети, так и в электрооборудовании потребителей электроэнергии [70,с.4, 71, 72,с.91, 73,с.61, 74,с.67].

Низкое качество электроэнергии в современных распределительных сетях объясняется значительным количеством электроприемников больших мощностей с нелинейным и несимметричным характером нагрузок [75,с.120, 76, с.456]. Для выявления, насколько скоррелировано качество электроэнергии с его потерями при передаче электроэнергии, необходимо установить причины возникновения потерь и их структуру. Выполнить эту задачу дает возможность активный эксперимент, что практически невозможно, так как он требует вмешательства экспериментатора, что исключено: исследователь не должен вклиниваться в производственный процесс. Выходом из этого положения является замена объекта исследования, его компьютерной моделью [77, с.44], что дает возможность изучения смоделированного объекта при меняющихся внешних воздействиях. Общеизвестно, что такой способ намного дешевле и доступнее натурального эксперимента. Исследователь может получить результат

намного быстрее и более глубоко оценить степень влияния каждого параметра модели на поведение объекта исследования. Поэтому поставленные в диссертации задачи решены с использованием технологии компьютерного моделирования.

3.1. Влияние нелинейных элементов сети на качество электроэнергии и оценка его последствий с использованием пакета программ MatLab/SimPowerSystems/Simulink [58, с.117]

Пакет программ в составе MatLab, куда входят многие приложения, в том числе и Simulink/ SimPowerSystems, обладает рядом достоинств. Например, исследователь, комбинируя возможности, заложенные в этих пакетах, может имитировать работу электротехнических устройств во временной области, а также выполнить различные виды их анализа. Кроме того, SimPowerSystems (SPS) позволяет моделировать сложные электротехнические системы, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. SPS обладает многочисленной библиотекой готовых блоков, необходимых для построения моделей исследуемых систем. При отсутствии необходимых исследователю моделей устройств их можно создать на основе Simulink и SPS - блоков [58, с.117]. Для создания моделей нелинейных резисторов и индуктивностей (насыщающегося реактора), которые будут использованы при разработке SPS – модели исследуемой сети воспользуемся рекомендациями, данными в [78, с.288]. В качестве модели использована электрическая цепь с резистором, имеющая нелинейную вольт-амперную характеристику (рисунок 3.1.1)

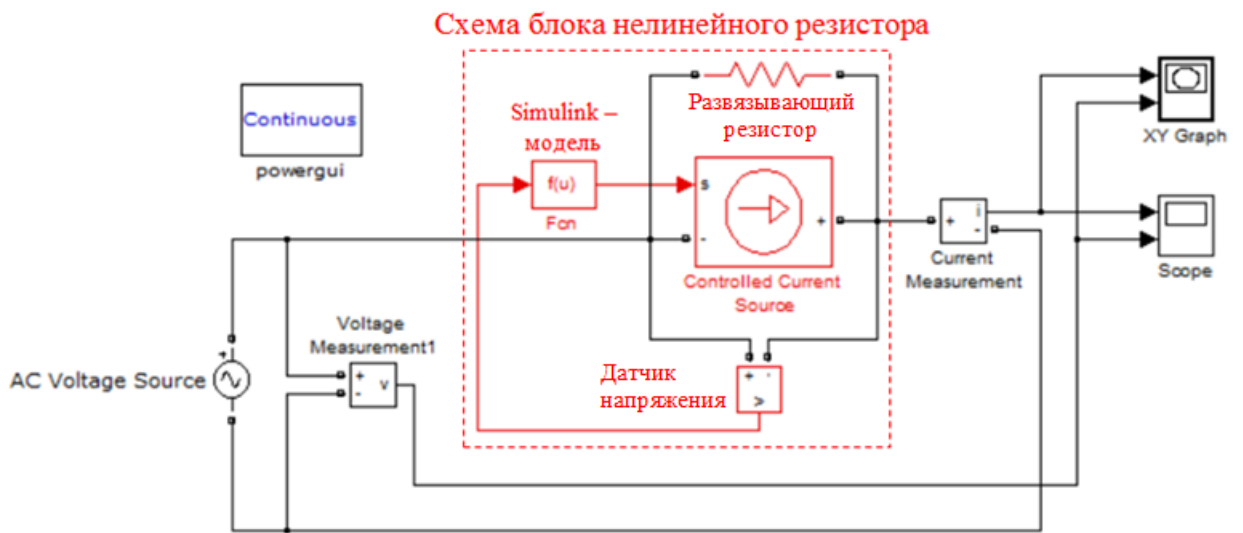


Рисунок 3.1.1 - Схема с нелинейным резистором

Во внутренней области прямоугольника, ограниченного пунктирными линиями, расположена схема блока нелинейного резистора. Кроме того, на схеме показаны приборы измерения тока и напряжения, графопостроитель XY-Graph.

Модель рассматриваемого устройства имеет следующую структуру. Управляемый источник тока шунтирован датчиком напряжения. Simulink – модель резистора с нелинейной ВАХ подключен между зажимами выхода датчика и зажимом входа источника тока (ИТ), параллельно которому подключён резистор с целью развязывания элементов схемы. Этот резистор необходим, так как многие SPS блоки представляют собой источники тока, последовательное соединение которых не допустимо, а развязывающий резистор позволяет последовательное соединение этих блоков. Реализовать Simulink - модель резистора можно различными способами, например, написать программу на языке MatLab и конвертировать ее в Simulink – блок, однако более удобно использовать готовый F_{cn} - блок, пример использования которого представлен на рисунке 3.1.2. На этом же рисунке показано окно задания параметров блока с полем *Expression*, в которое записывается математическое выражение, определяющее необходимую для моделирования функцию. При

вводе математического выражения в это поле надо придерживаться правила записи операторов функции языка программирования С.

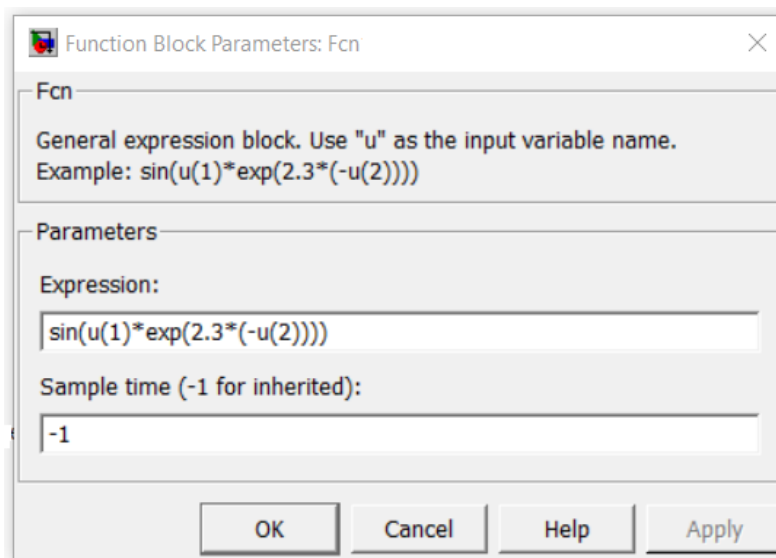
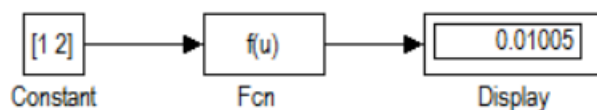


Рисунок 3.1.2. Пример использования окна задания параметров блока F_{cn}

3.1.1. Модель нелинейного резистора [58, с.117]

Разработка блока нелинейного резистора (БНР) начинается с создания входов и выходов модели в среде Simulink, при этом входной сигнал по характеру пропорционален величине подводимого к БНР напряжения, а выходной сигнал току этого блока. На схеме (рисунок 3.1.1.4) БНР выступает как управляющий элемент.

Допустим, что формула [18,с.29]:

$$\log i = \log I_0 + \alpha(\log u - \log U_0). \quad (3.1.1.4)$$

выражает функциональную связь напряжения и тока нелинейного резистора, имитирующего некоторое устройство реальной сети, где i и u – мгновенные

значения тока и напряжения; U_0 – пороговое значение напряжения; I_0 – значение тока устройства при заданной величине напряжения, соответствующее пороговому значению; α – величина, определяющая степень нелинейности резистора, $0 < \alpha < 50$

Рассматриваемая схема БНР представлена во внутренней области пунктирного прямоугольника на рисунке 3.1.1, реализованная с помощью блока F_{cn} со следующими численными значениями параметров: $U_0 = 110$ кВ; $I_0 = 500$ А; $\alpha = 25$.

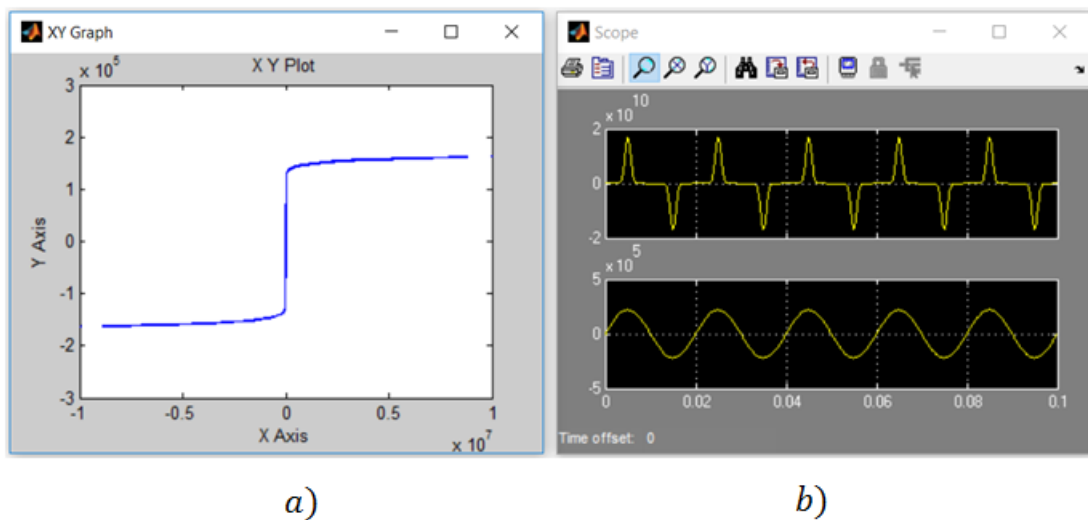


Рисунок 3.1.1.1 - Графическое представление ВАХ и временных зависимостей напряжения, подаваемого на зажимы резистора, и тока, текущего через него

На рисунке 3.1.1.1, *a* показан результат моделирования в виде графической зависимости ВАХ, а где *b*- временные диаграммы тока и напряжения нелинейного резистора.

С помощью SPS - модели (рисунок 3.1.1.2) исследуем, как на гармонический состав тока в сети влияет нелинейный резистор. Исследуемая сеть состоит из блоков на рисунке 3.1.1.2, ограниченных пунктирными прямоугольниками. Назначение этих блоков заключается в следующем: 1– формирование сигнала управления, (рисунок 3.1.1.2, а), который является безразмерным Simulink – сигналом, закон изменения которого соответствует

работе нелинейного резистора; 2 – содержание блока $R_{нр-ш}$, представляющего нелинейный резистор (блок 3), шунтированный RLC – ветвью.

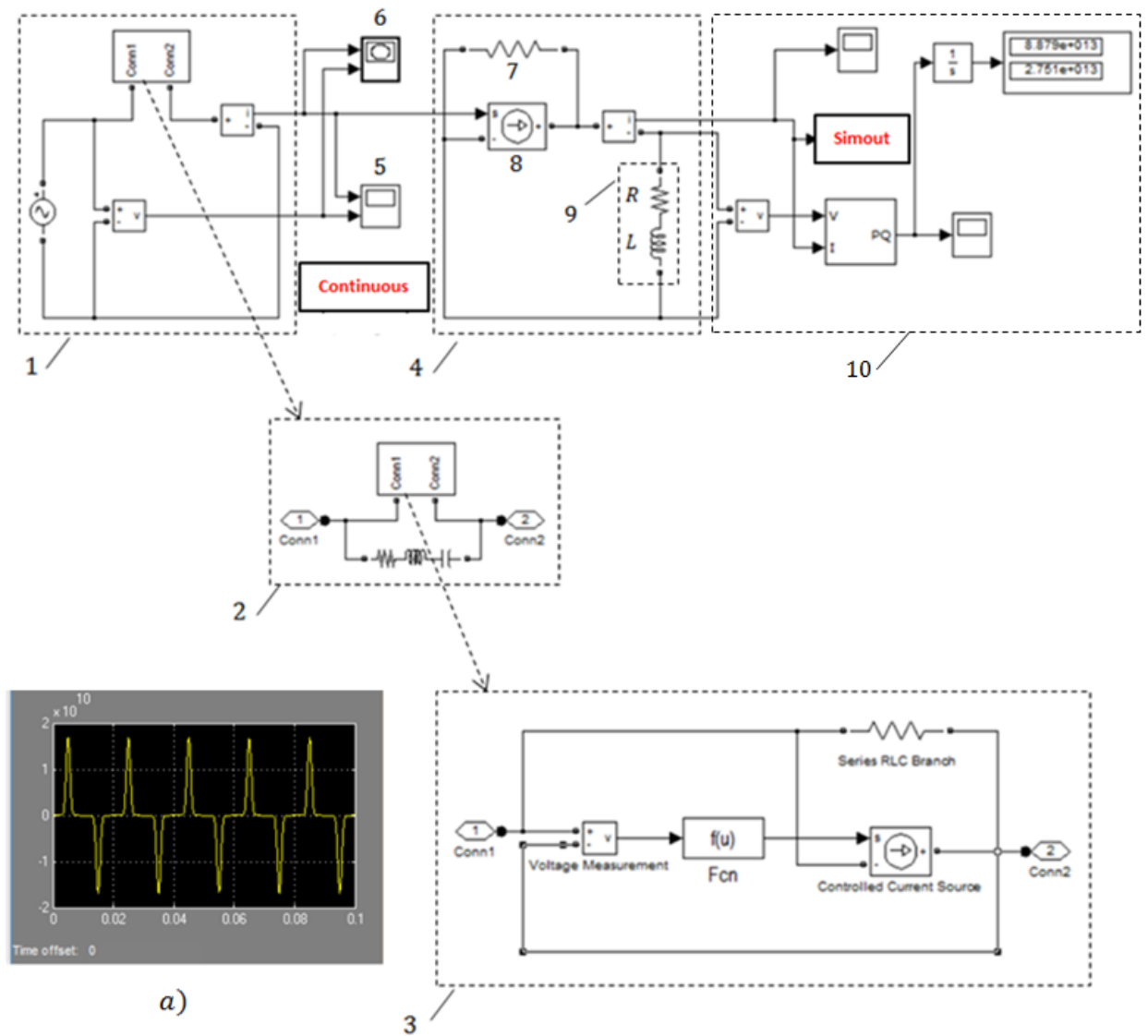


Рисунок 3.1.1.2 - SPS – модель участка исследуемой сети

Наличие шунта необходимо, так как он обеспечивает устойчивое функционирование нелинейного резистора, т.е. чтобы была устойчива его ВАХ; 3 – схема, представляющая модель нелинейного резистора; 4 – схема, формирующая в нагрузке 9 электрический ток в соответствии с сигналом управления (рисунок 3.1.1.2, а), при этом использован управляемый источник тока 8, который шунтирован резистором 7; 5 - осциллограф; 6 – графопостроитель; 10 - измерительный блок, содержащий осциллограф, на экране которого высвечивается временная зависимость потери мощности при

$R - L$ нагрузке. Блок содержит и дисплей, показывающий потери энергии за период продолжительности моделирования.

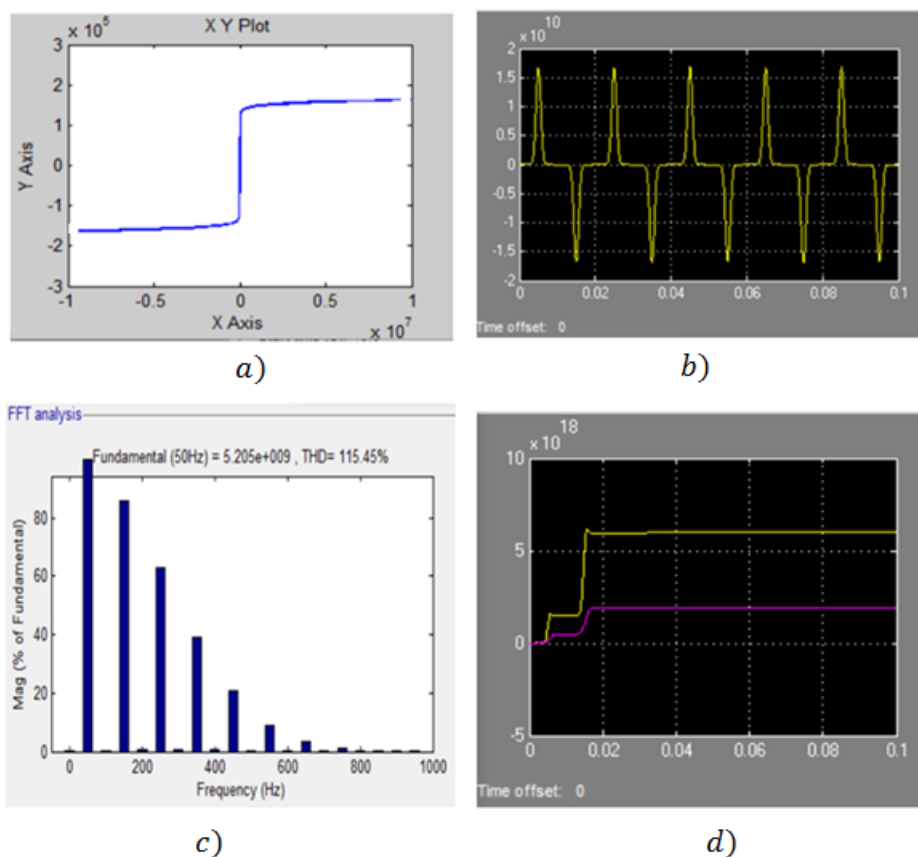


Рисунок 3.1.1.3 - Результаты численного эксперимента

Для оценки степени уровня корреляции качества электроэнергии с потерей мощности в элементе электрической сети ($R - L$) проведены вычислительные эксперименты (ВЭ) при следующих исходных данных: $U_0 = 110$ кВ; $I_0 = 500$ А; $\alpha = 25$.

Результаты численного эксперимента. На рисунке 3.1.1.3 представлены: a – ВАХ нелинейного резистора, шунтированного RLC – ветвью; b , c – соответственно, временная зависимость и спектральный состав тока в нагрузке ($R - L$); d – временная зависимость потери мощности в нагрузке R .

Для сопоставления повторены ВЭ при $\alpha = 24$ при прочих равных параметрах.

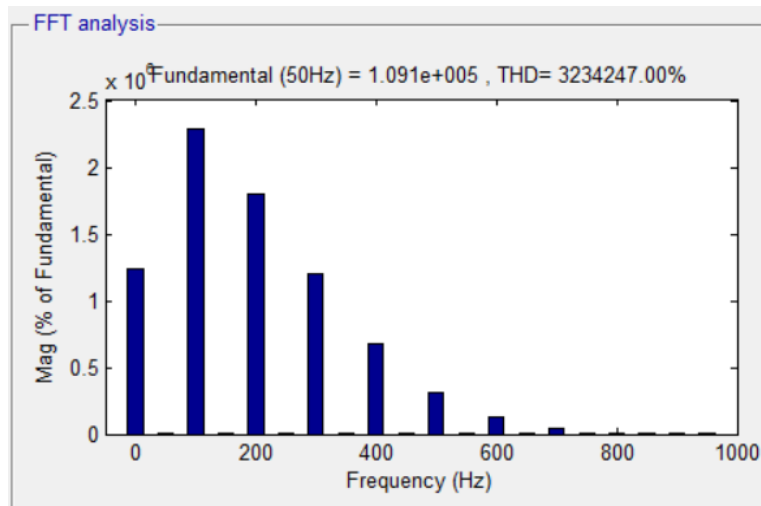


Рисунок 3.1.1.4 - Спектральный состав тока в нагрузке ($R - L$) при $\alpha = 24$

Сравнение результатов эксперимента показало, что изменение характера нелинейности НР существенно изменил спектральный состав тока в резисторе (рисунок 3.1.1.4) и величины потерь мощности и энергии. Полученные результаты имеют важное практическое значение.

Проведем исследование влияния на качество и потери электроэнергии изменение степени нелинейности индуктивности в электрической сети.

3.1.2. Математическая модель индуктивности с нелинейной характеристикой

Процесс создания модели для нелинейной индуктивности (НИ) ничем не отличается от рассмотренной выше последовательности создания модели нелинейного резистора, т.е. сначала находим математическое выражение, определяющее модель НИ. Пусть уравнения, связывающие мгновенные значения тока i , напряжения u и потокосцепления ψ НИ представлены формулами [18,с.29]:

$$u = R_i + \frac{d\psi}{dt}. \quad (3.1.2.1)$$

$$i = a\psi + b\psi^3. \quad (3.1.2.2)$$

где a , b – параметры модели, связывающие зависимости между потокосцеплением и током и определяющие степень нелинейности катушки индуктивности. Первое дифференциальное уравнение (3.1.2.1) – определяет на индуктивности напряжение. Второе (3.1.2.1) – связывает ток реактора с потокосцеплением. Его структура зависит от задания точности аппроксимации нелинейности индуктивности: оно может быть и другим.

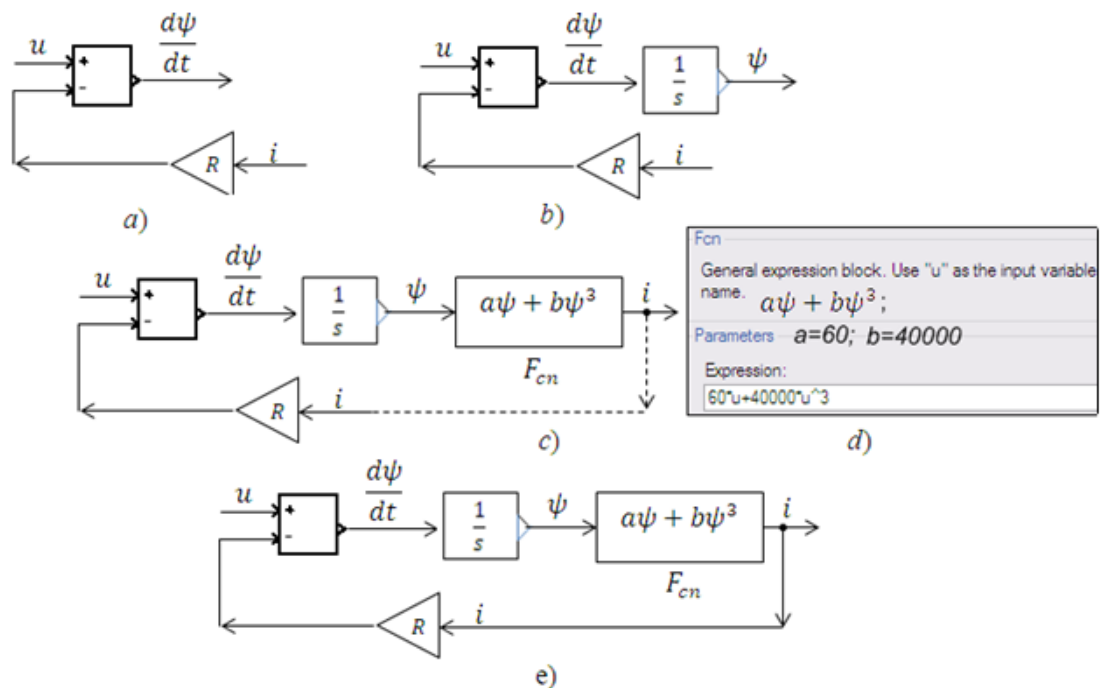


Рисунок 3.1.2.1 – Пример построения математической модели нелинейной индуктивности

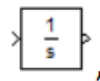
Для создания Simulink – модели запишем предварительно уравнение (3.1.2.3) в виде:

$$u = R_i + \frac{d\psi}{dt}. \quad (3.1.2.3)$$

Выполнив команду с помощью навигации File – New – Model, получаем новую модель с названием untitled.mdl.

В появившееся окно перетащим блок суммирования – **Sum**, блок усилителя – **Gain**, назначение которого - выполнять умножение входного сигнала на постоянный коэффициент, и реализуем математические операции над величинами u , R , i в соответствии с правой частью (3.1.2.3). В результате на выходе блока суммирования формируется производная по времени от потокосцепления (рисунок 3.1.2.1, а): $d\psi/dt$.

Для получения текущего значения потокосцепления ψ значение производной $d\psi/dt$ подадим на вход блока интегратора



предварительно перетащив этот блок из библиотеки Simulink (рисунок. 3.1.2.1, б). Simulink – модель выражения (3.1.2.2) осуществляем с помощью F_{cn} – блока (рисунок 3.1.2.1, с), а где d представлено окно задания параметров этого блока. Значения коэффициентов нелинейной зависимости между потокосцеплением и током и величина активного сопротивления индуктивности (реактора) приняты: $a = 60$, $b = 40000$, $R = 2$ Ом. После подстановки этих величин Simulink – модель реактора (индуктивности) имеет вид рисунок 3.1.2.2.

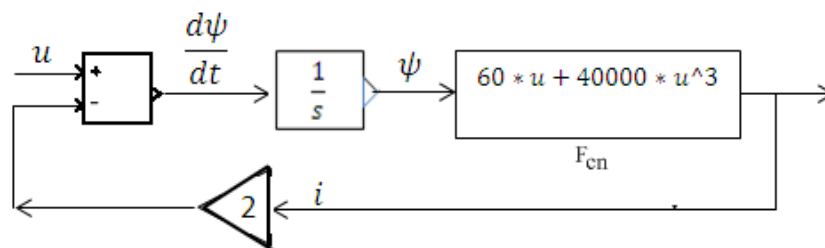


Рисунок 3.1.2.2 - Simulink – модель насыщающегося реактора (индуктивности)

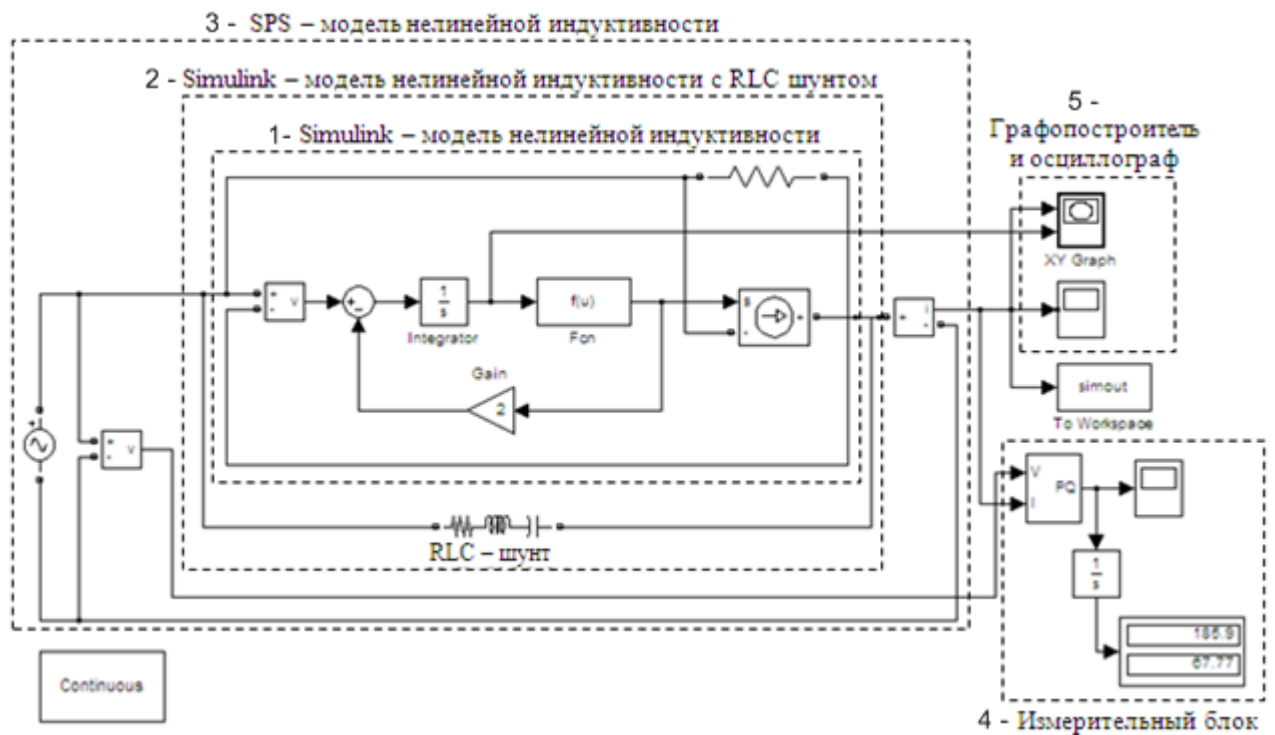


Рисунок 3.1.2.3 - SPS – модель нелинейной индуктивности
(насыщающегося реактора)

На рисунке 3.1.2.3, показаны: 1– Simulink модель НИ; 2 – Simulink модель НИ, шунтированной RLC ветвью. Назначение шунта аналогично, он обеспечивает устойчивую работу НИ, т.е. устойчивость вебер-амперной характеристики; 3 – SPS модель НИ; 4 – измерительный блок, содержащий осциллограф и дисплей, отображающие соответственно временную зависимость потерь активной и реактивной мощностей и потери энергии за промежуток времени моделирования; 5 – в этом блоке содержатся графопостроитель и осциллограф, где отображаются соответственно вебер-амперная характеристика НИ и временная зависимость величины тока в НИ.

Проведем численный эксперимент для оценки влияния степени нелинейности НИ на спектральный состав тока, проходящего через него, и на величину потерь мощности и энергии в нем при $a = 60, b = 40000$ и $R = 2$ Ом в выражениях (3.1.2.1, 3.1.2.2).

Результаты численного эксперимента

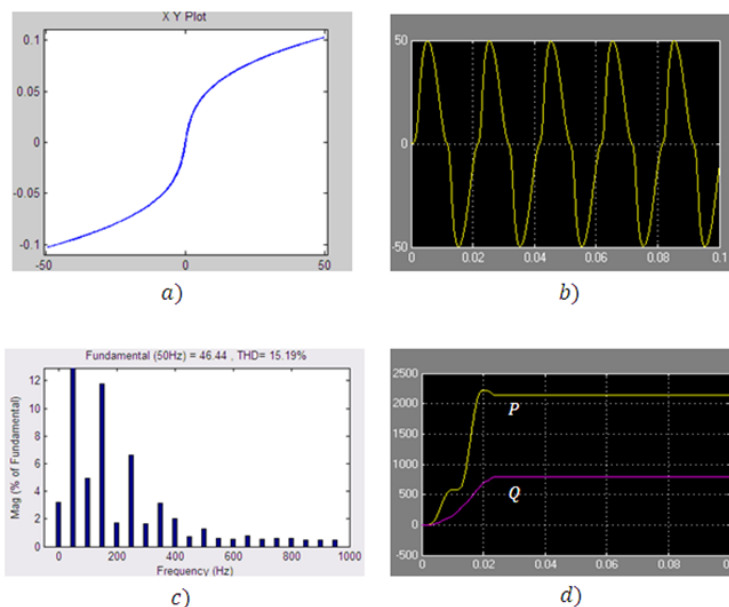


Рисунок 3.1.2.4 - Результаты численного эксперимента

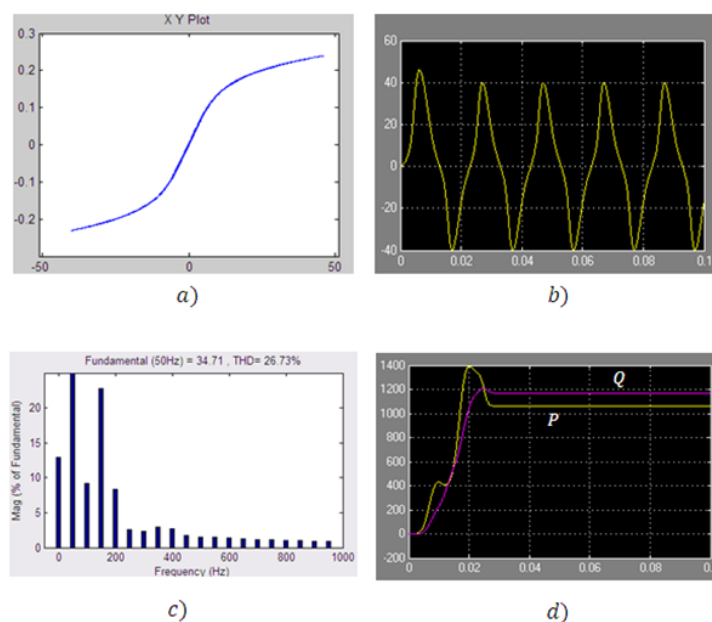


Рисунок 3.1.2.5 - Результаты численного эксперимента при другой степени нелинейности НИ

На рисунке 3.1.2.4, изображены: a – вебер-амперная характеристика нелинейной индуктивности; b – временная зависимость тока, текущего через нелинейную индуктивность; c – спектральный состав тока, текущего через нелинейную индуктивность; d – временная зависимость потерь активной P и реактивной Q мощностей в нелинейной индуктивности.

Эксперимент был продублирован при тех же значениях $a = 60$, $b = 40000$ и $R = 2$ Ом, но при степени нелинейности индуктивности (насыщающегося реактора) равной 5.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.1.2.5. Сопоставления результатов эксперимента (рисунок 3.1.2.4 и 3.1.2.5) показывают существенное влияние степени нелинейности насыщающегося реактора на все процессы, происходящие в цепи, содержащей НИ, в том числе и на потери, обусловленные гармониками и интергармониками.

Для обоснования влияния гармоник и интергармоник на увеличение потерь рассмотрим два вопроса: первый дадим теоретическое обоснование формулы определения плотности тока по сечению проводника при повышенных частотах тока и напряжения; второй - аналитическое описание интергармоник (*позволяет определить доли потерь от них*).

3.2. Обоснование формулы расчета плотности тока по сечению проводника и активного его сопротивления на основе уравнения Максвелла

Особенностями всех процессов, происходящих в цепи, содержащей нелинейные элементы (НЭ), в том числе и НИ, являются появления высших гармоник и интергармоник в этих элементах, которые приводят к дополнительным потерям [59, с.58] в проводящих элементах в связи с изменением в них по сечению плотности тока, которая определяется достаточно просто при занятии проводником полупространства [93, с.12], как показано на рисунке 3.2.1, при течении тока вдоль оси X и расположении поверхности провода на плоскости XZ .

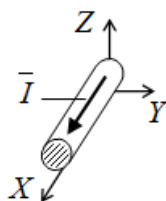


Рисунок 3.2.1 – Геометрия полупространства, занятого проводом [93,с.12]

При совместном использовании уравнений Максвелла [94, с.263] и закона Ома в дифференциальной форме находим закон распределения тока в проводнике и глубину D его проникновения :

$$\operatorname{rot} \bar{B} = \mu\mu_0 \bar{J}; \quad (3.2.1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad (3.2.2)$$

$$\bar{j} = \gamma \bar{E}. \quad (3.2.3)$$

После подстановки (3.2.3) в (3.2.1) и дифференцированием обеих частей по времени :

$$\operatorname{rot} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \mu\mu_0 \gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}. \quad (3.2.4)$$

С учетом второго уравнения Максвелла (3.2.2) имеем:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \bar{E} = \mu\mu_0 \gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}. \quad (3.2.5)$$

Так как [97, с.296]

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \bar{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{E} - \nabla^2 \bar{E}$$

и

$$\operatorname{div} \bar{E} = 0,$$

получим

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu\mu_0 \gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}. \quad (3.2.6)$$

Учитывая геометрическое представление (рисунок 3.2.1), можем записать:

$$j_x = j_x(y, t), j_y = j_z = 0,$$

$$E_x = E_x(y, t), E_y = E_z = 0.$$

Тогда

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = \mu\mu_0\gamma \frac{\partial E_x}{\partial t}. \quad (3.2.7)$$

Учитывая гармоничность параметров в (3.2.7), уравнение примет вид [59,с.58, 93,с.12]:

$$E_x(y, t) = E_0(y)e^{i\omega t}. \quad (3.2.8)$$

После некоторых простых математических преобразований получаем уравнение для амплитуды $E_0(y)$ [93, с.12, 94,с.263]:

$$\frac{\partial^2 E_0}{\partial y^2} = i\gamma\mu\mu_0\omega E_0. \quad (3.2.9)$$

Общее решение этого уравнения (3.2.9) имеет вид

$$E_0 = A_1 e^{-ky} + A_2 e^{ky}.$$

Учитывая, что [93,с.12]

$$k = \sqrt{i\gamma\mu\mu_0\omega} = \alpha(1 + i), \text{ где } \alpha = \sqrt{\gamma\mu\mu_0\omega/2},$$

находим

$$E_0(y) = A_1 e^{-\alpha y} e^{-i\alpha y} + A_2 e^{\alpha y} e^{i\alpha y}. \quad (3.2.10)$$

Анализируя выражение (3.2.10), замечаем, что при $y \rightarrow \infty$, т.е. с удалением от поверхности проводника возникает в этом выражении физически недопустимая ситуация, т.е. второе слагаемое неограниченно возрастает. Поэтому $A_2 = 0$, следовательно, в окончательном решении остается только первое слагаемое. Тогда $E_x(y, t)$ имеет вид:

$$E_x(y, t) = A_1 e^{-\alpha y} e^{i(\omega t - \alpha y)}. \quad (3.2.11)$$

Выполним следующие преобразования.

После выделения действительной части из (3.2.11) и подстановки в (3.2.3) получим выражение плотности тока в проводнике [93, с.12]:

$$j_x(y, t) = j_0 e^{-\alpha y} \cos(\omega t - \alpha y). \quad (3.2.12)$$

Из (3.2.12) видно, что плотность тока \bar{j} с глубиной проникновения в проводник убывает по экспоненциальному закону:

$$j(y) = j_0 \exp(-y/\delta), \quad (3.2.13)$$

где

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\omega \mu \mu_0 \lambda / 2}}. \quad (3.2.14)$$

В (3.2.14) и на рисунке 3.2.2 δ –толщина скин – слоя; j_0 -плотность тока у поверхности проводника; μ_r –относительная магнитная проницаемость материала (безразмерная); μ_0 -магнитная постоянная; λ -удельная электрическая проводимость; $\omega = 2\pi f$ -круговая частота переменного тока.

Расчет активного сопротивления проводящего элемента. Учитывая, что при высокой частоте ток протекает не по всему сечению проводника, то для определения активного сопротивления проводящего элемента (меди) находим эффективную площадь сечения.

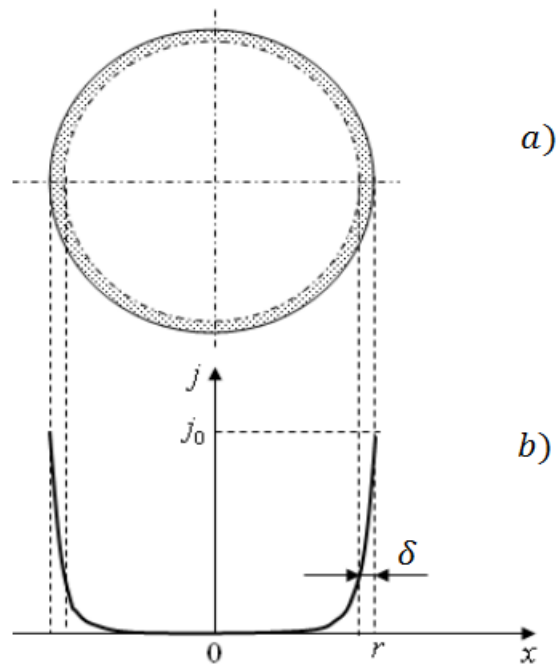


Рисунок 3.2.2 - *a* - заштрихован скин-слой в проводнике; *b* - кривая распределения плотности переменного тока в проводнике при заданной частоте переменного тока

Преобразуем (3.2.14):

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{\sqrt{\omega \mu_r \mu_0 \lambda / 2}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \lambda}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot f \cdot \lambda}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}, \end{aligned} \quad (3.3.15)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, f – частота переменного тока.

Для меди $\mu_r = 1$. При известной глубине проникновения, определим эффективное сечение и активное сопротивление проводящего элемента. Так активное сопротивление медной проволоки длиной l м:

$$R_l = \frac{\rho \cdot l}{S_{\text{эфс}}}, \quad (3.2.16)$$

это $S_{\text{эфс}}$ — эффективное сечение проволоки.

Подставляя в (3.2.16) значение эффективного сечения из выражения:

$$S_{\text{эфс}} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} - \pi \cdot \frac{(d - 2\delta)^2}{4}, \quad (3.2.17)$$

окончательно получим формулу для вычисления сопротивления как функции от частоты:

$$R_l = \frac{\rho \cdot l}{S_{\text{эфс}}} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} - \pi \cdot \frac{(d - 2\delta)^2}{4}}. \quad (3.2.18)$$

Как видно из (3.2.18), эффективное сечение и сопротивление изменяются в результате изменения частоты, и, как следствие изменения глубины проникновения тока.

3.3. Аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник для совместного их графического представления

Несинусоидальные токи. Как было отмечено в главе 1, несинусоидальные токи появляются в цепи работы электрической нагрузки с нелинейной вольт-амперной характеристикой (например, преобразователей частоты, выпрямителей). В этих случаях, для анализа процессов, протекающих в проводнике, используется теорема Фурье, когда несинусоидальные периодически изменяющиеся напряжения и токи заменяются суммой постоянной величины и ряда синусоидальных величин с кратными частотами, т.е.

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \psi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \psi_2) + \\ + A_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots, =$$

$$= A_0 + \sum_{n=1}^k A_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad k = 2, \dots, 23 \quad (3.3.1)$$

или

$$y(t) = A_0 + A_1 \sin(x + \psi_1) + A_2 \sin(2x + \psi_2) + \\ + A_3 \sin(3x + \psi_3) + \dots, \quad (3.3.2)$$

где A_1, A_2, A_3, \dots - амплитуды первой, второй, третьей и т.д. гармоник;
 $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots$ - их начальные фазы.

Выражение (3.3.1) можно представить и в виде:

$$y(t) = A_0 + B_1 \sin x + B_2 \sin 2x + B_3 \sin 3x + \dots \\ \dots + C_1 \cos x + C_2 \cos 2x + C_3 \cos 3x + \dots \quad (3.3.3)$$

Которое получится, при использовании известной тригонометрической формулы. Например, k -ую гармонику в (3.3.2) можно записать в виде:

$$A_k \sin(kx + \psi_k) = A_k \sin kx \cos \psi_k + A_k \cos kx \sin \psi_k, \quad (3.3.4)$$

где k - любое целое положительное число.

Введем следующие обозначения

$$A_k \cos \psi_k = B_k; \quad A_k \sin \psi_k = C_k,$$

Тогда (3.3.4) примет следующий вид

$$A_k \sin(kx + \psi_k) = B_k \sin kx + C_k \cos kx. \quad (3.3.5)$$

И в результате получим (3.3.5).

Для совместного аналитического описания интергармоник с остальными гармониками и их графического представления, рассмотрим состав циркулирующего тока в электрической цепи, представленной на рисунке 3.3.1.

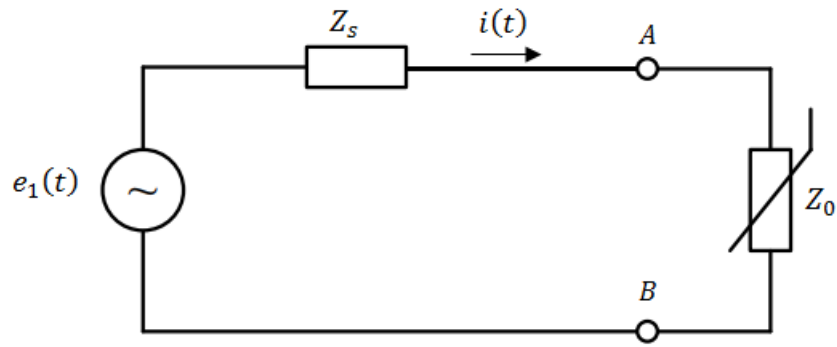


Рисунок 3.3.1 - Схема подключения нелинейной нагрузки

Источником высших гармоник и интергармоник в схеме, изображенной на рисунке 3.3.1, является нелинейная нагрузка с соответствующими параметрами, т.е.:

$$i(t) = i_1(t) + i_{hh}(t) + i_{ih}(t), \quad (3.3.6)$$

Аналитическое представление несинусоидального тока $i(t)$ (3.3.6) без интергармонической составляющей $i_{ih}(t)$ мы уже рассмотрели в виде (3.3.1) или (3.3.4).

Рассмотрим аналитическое представление интергармонических составляющих.

Сначала рассмотрим сложение двух интергармонических колебаний с одинаковыми амплитудами, но с разными частотами, не кратными частоте основной гармоники. Записав эти колебания в виде

$$\begin{aligned} x_1 &= a \cdot \sin \omega_1 t \\ x_2 &= a \cdot \sin \omega_2 t, \end{aligned} \quad (3.3.7)$$

и предполагая, что частота второй интергармоники больше частоты первой ($\omega_2 > \omega_1$), получим для результирующего смещения выражение вида:

$$x = x_1 + x_2 = a \cdot (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) =$$

$$= 2a \cdot \sin \frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} \cdot \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2}. \quad (3.3.8)$$

Это выражение описывает синусоидальные колебания со средней частотой $(\omega_1 + \omega_2)/2$ и модулированной амплитудой смещения $2a$ (рисунок 3.3.2). Амплитуда изменяется от 0 до $2a$ и по закону косинуса с намного меньшей частотой $(\omega_1 - \omega_2)/2$, равной половине разности частот исходных колебаний.

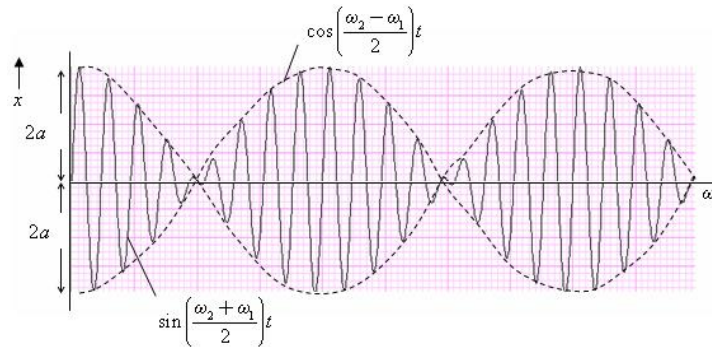


Рисунок 3.3.2 - Сложение двух интергармонических колебаний $x_1 = a \cdot \sin \omega_1 t$ и $x_2 = a \cdot \sin \omega_2 t$ при $\omega_2 > \omega_1$

Предположим, что колебания имеют вид

$$x_1 = a_1 \cdot \sin \omega_1 t \text{ и } x_2 = a_2 \cdot \sin \omega_2 t.$$

причем $a_2 > a_1$, получим, что результирующее смещение x запишется в виде

$$x = x_1 + x_2 = a_1 \cdot \sin \omega_1 t + a_2 \sin \omega_2 t. \quad (3.3.9)$$

Если в (3.3.9) коэффициент a_2 (2ая интергармоника) запишем в виде суммы

$a_2 = a_1 + b$, то

$$\begin{aligned} x = x_1 + x_2 &= a_1 \cdot \sin \omega_1 t + a_2 \sin \omega_2 t = a_1 \cdot \sin \omega_1 t + (a_1 + b) \cdot \sin \omega_2 t = \\ &= a_1 \cdot \sin \omega_1 t + a_1 \sin \omega_2 t + b \cdot \sin \omega_2 t = \\ &= a_1 \cdot (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) + b \cdot \sin \omega_2 t. \end{aligned} \quad (3.3.10)$$

Используя (3.3.9), выражение (3.3.10) можем записать так:

$$x = 2a_1 \cdot \sin \frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} \cdot \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} + b \cdot \sin \omega_2 t. \quad (3.3.11)$$

Как видно из (3.3.11), общая амплитуда увеличилась за счет наложения

синусоидальных колебаний со средней частотой $(\omega_1 + \omega_2)/2$ и модулированной амплитуды смещения $2a$. Этим можно обосновать увеличение потерь в проводнике за счет возникновения дополнительных потерь мощности. Следовательно, исследователям необходимо будет уделять особое внимание тщательному изучению всех причин возникновения интергармоник, а также приведению действующей нормативной базы в соответствие с международными стандартами.

Как отмечают в научных публикациях, в настоящее время полного понимания природы интергармоник нет. По – видимому, этим фактом объясняется возникновение повышенного интереса к этому явлению [10,с.284].

В работе [95,с.7] приводится анализ процессов в цепи (рисунок 3.3.1), где дано обоснование энергетических процессов в нелинейной цепи (рисунок 3.3.2). Более расширенный материал по этому вопросу дан в обзорном материале диссертации (глава 1).

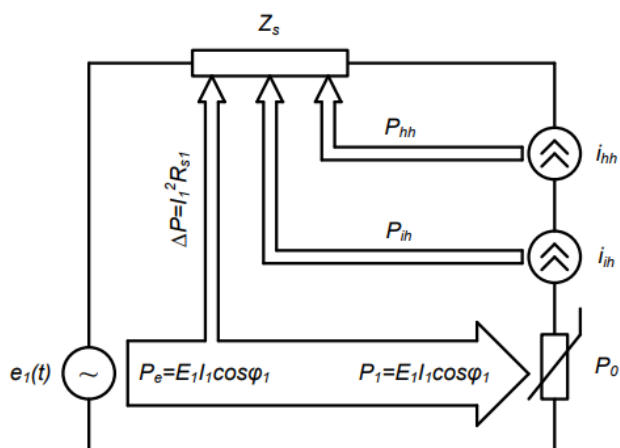


Рисунок 3.3.3. Энергетическая диаграмма для электрической цепи Величины, показанные на этой диаграмме в работе [95,с.7], определяются следующим образом:

напряжение на зажимах нагрузки

$$U_{AB}(t) = e_1(t) - i(t)R_s - L_s \frac{di}{dt}, \quad (3.3.12)$$

а ток (3.3.6) можно записать в виде:

$$i(t) = i_1(t) + \sum_{k=2}^{\infty} i_{hhk}(t) + \sum_{n=2}^{\infty} i_{ihn}(t), \quad (3.3.13)$$

при этом активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U_{AB}(t)i(t)dt. \quad (3.3.14)$$

Подставив в (3.3.14) формулы (3.3.12) и (3.3.13), после несложного преобразования получим:

$$P_0 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 - \sum_{k=2}^{\infty} I_{hhk}^2 R_{Sk} + \sum_{n=2}^{\infty} I_{ihn}^2 R_{Sn} = P_1 - P_{hh} - P_{ih}, \quad (3.3.15)$$

где $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ – активная мощность основной гармоники;

$$P_{hh} = \sum_{k=2}^{\infty} I_{hhk}^2 R_{Sk} \text{ – активная мощность высших гармоник;}$$

$$P_{ih} = \sum_{n=2}^{\infty} I_{ihn}^2 R_{Sn} \text{ – активная мощность интергармоник.}$$

МЭК в своем стандарте после глубоких исследований приняла такое ограничение: напряжения интергармоник составляет 0,2 % от номинального напряжения основной гармоники [103].

3.4. Виртуальный прибор в среде LabVIEW для анализа взаимодействий гармонических и интергармонических колебаний

Как было отмечено в обзорном анализе, проведенном в главе 1, в настоящее время положения, связанные с ИГ, находятся на стадии разработки. Однако проведенное выше аналитическое описание несинусоидального тока в

составе интергармоник не дает качественной информации о степени влияния отдельных интергармоник на форму кривых, описывающих токи и напряжения во временной области, а, следовательно, и на качество электроэнергии. Поэтому в этом параграфе диссертации поставлена задача разработки ВП, позволяющего анализировать качественное влияние интергармонических колебаний на форму кривых тока и напряжения.

В настоящее время в системах электроснабжения современных промышленных предприятий по мнению многих ведущих специалистов РФ существует значительная доля нелинейных и резкопеременных нагрузок.

При функционировании резкопеременных нагрузок, а также нагрузок, получающих питание от преобразователей частоты, в амплитудном спектре сетевого тока наряду с высшими гармониками присутствует существенный спектр интергармоник, которые являются причинами возникновения дополнительных потерь мощности и электроэнергии в элементах электрических сетей. При этом в научных публикациях отмечается, что полного понимания природы электромагнитных возмущений, ассоциирующихся с интергармониками, еще нет, и в настоящее время к этому явлению не угасает повышенный интерес.

Разработанный в этой главе ВП в среде LabVIEW (рис. 3.4.1) позволил прояснить один из возможных причин возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение) обусловленный с нелинейной нагрузкой. Результаты численного эксперимента на примере с частотными компонентами (50, 92, 167, 270, 273, 276, 279, 282, 285, 288, 291) [Гц] и соответственно амплитудными (220, 40, 40, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20) [В] показало, что такой причиной является появление постоянной составляющей в составе сигнала (ток, напряжение).

Численный эксперимент также показал, что сумма основной гармоники и интергармоник ведет себя как случайный процесс 1, тогда как каждая из слагаемых временных функций детерминированы.

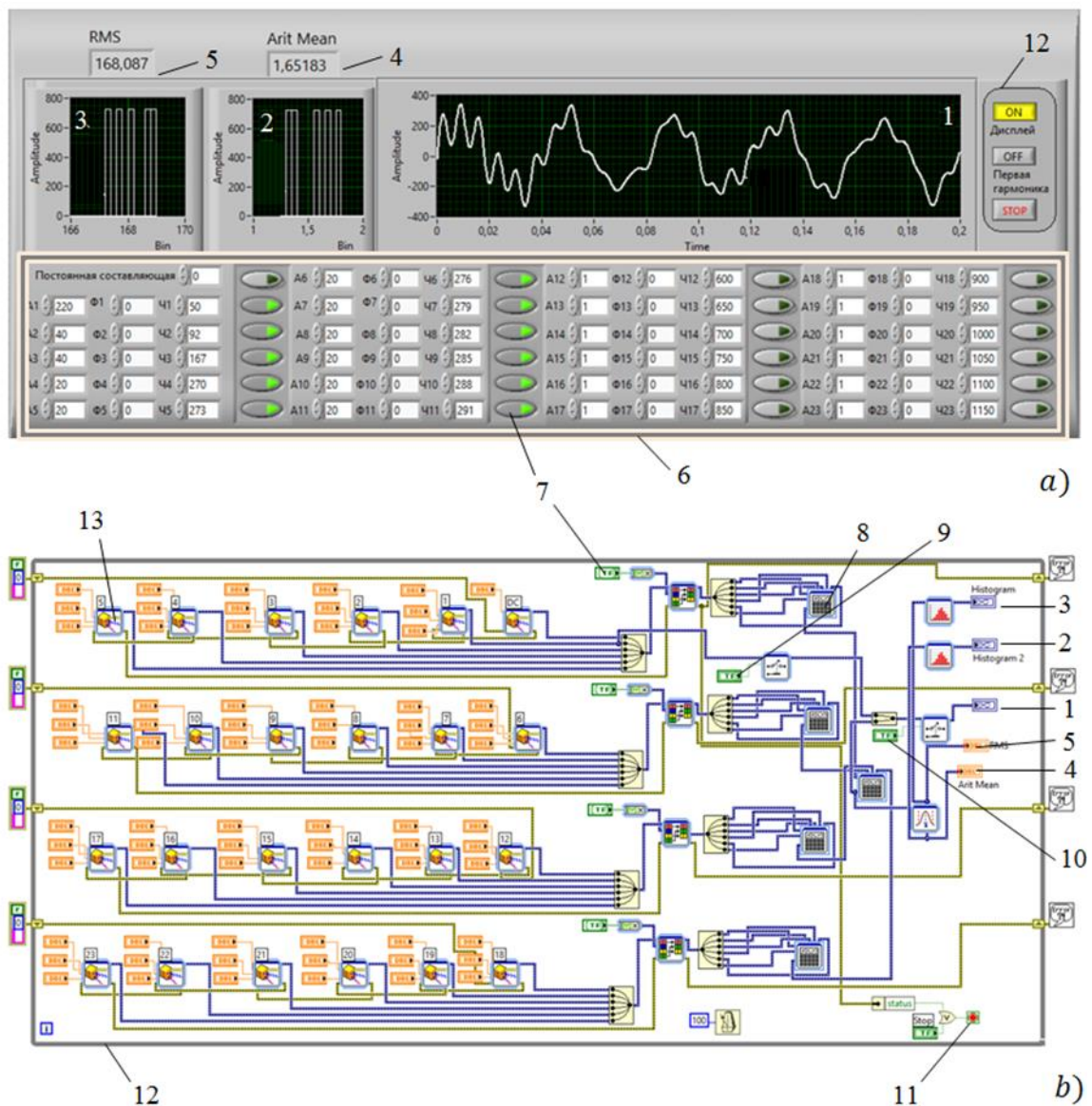


Рисунок 3.4.1 - Лицевая панель - *a* и блок-диаграмма *b* ВП

Интерфейсная часть (передняя панель) ВП показана на рисунке 3.4.1. *a* , а функциональная - на рисунке 3.4.1. *b*

На рисунке 3.4.1 *a*, представлены: 1, 2, 3 графические индикаторы, в виде осциллографа на экране которых изображаются результаты моделирования, соответственно сигнала в виде случайного процесса и его вероятностные характеристики (гистограммы - Arit Mean и RMS); 12 – пульт управления. Пульт управления состоит из кнопок: включения /отключения экрана осциллографа (первая сверху); вывода графика первой гармоники на экран (средняя кнопка); включения /отключения ВП; 6 – область лицевой панели, где

расположены средства ввода параметров моделируемых гармоник/интергармоник. К параметрам относятся величины: амплитуда A_i , фаза Φ_i и частота ω_i , i -ой гармоники/интергармоники.

На рисунке 3.4.1 *b*, представлен соответственно: 13 – Экспресс-ВП для имитации сигнала, который может воспроизводить синусоидальное, прямоугольное, треугольное, пилообразное колебания или шумовой сигнал; 7 – четыре группы из шести логических элементов в виде кнопок; 8 – пять Экспресс ВП - Формула для математической обработки входных данных. Входящие и выходящие данные в Экспресс ВП имеют динамический тип, данные другого типа преобразуются в динамический. Логические элементы 9, 10 на передней панели представлены кнопками управления экраном осциллографа и вводом / выводом графика первой гармоники на экран; 1, 2, 3 – на блок-диаграмме представляют осциллографы; 11 – кнопка включения / отключения ВК, на передней панели представлена изображением кнопки Stop; 12 – цикл по условию осуществляет итерационное выполнение программы внутри данной структуры до нажатия кнопки Stop.

Возможные подключения Экспресс-ВП 4 и 6 соответственно показаны на рисунках 3.4.2 и 3.4.3.

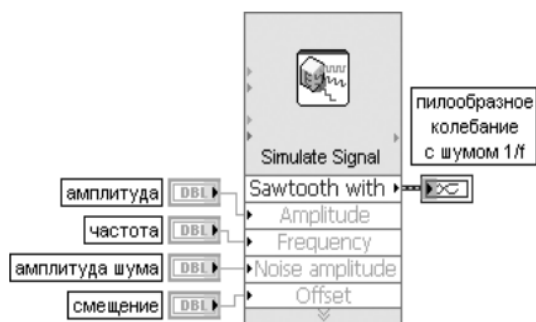


Рисунок 3.4.2 - Блок-диаграмма возможного подключения Экспресс-ВП - 4 для имитации сигнала

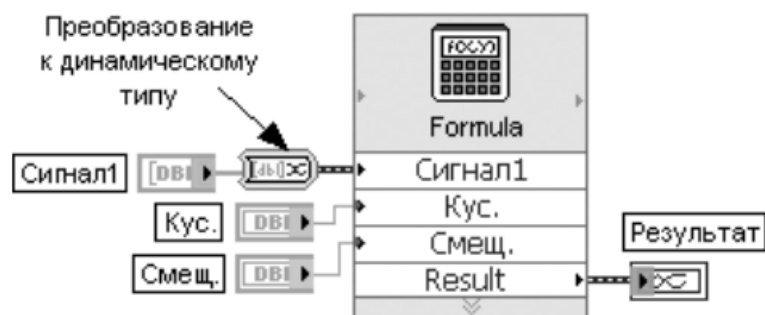


Рисунок 3.4.3 - Блок-диаграмма варианта подключения Экспресс-ВП - 6 формула

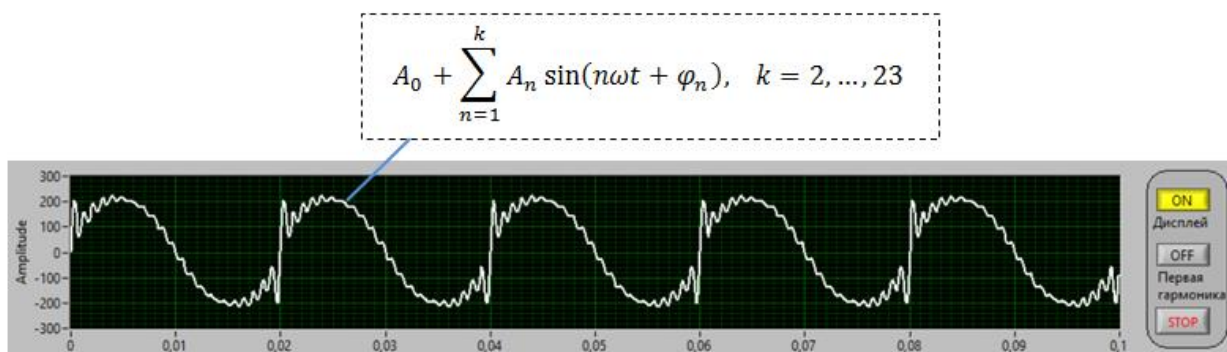


Рисунок 3.4.4 - Результат моделирования (не выведена на экран первая гармоника – кнопка отключена)

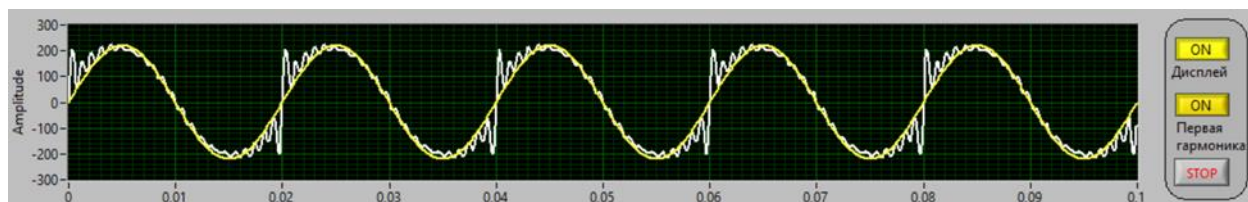


Рисунок 3.4.5 - Результат моделирования (на экран выведена первая гармоника – кнопка включена)

На рисунках 3.4.4 и 3.4.5, в качестве демонстрации возможности управления работой ВП показаны результаты моделирования ВП при следующих параметрах моделирования: амплитуда напряжения первой гармоники $A_1 = 220$ В, второй, третьей и двадцать первой гармоник равны $A_2 = A_3 = A_{21} = 20$ В, остальных 19 гармоник – 10 В. Начальные фазы всех гармоник равны нулю. Частота первой основной гармоники равна 50 Гц. Частота остальных подряд идущих гармоник кратна 50 Гц (100, 150, ... , 1150)

Гц. Значение постоянной составляющей $A_0 = 0$.

С целью проверки на работоспособность разработанного ВП проведем сопоставление результатов эксперимента (пример сигнала с интергармониками) (рисунок 3.4.6) в работе [88,с.329] с результатом моделирования (рисунок 3.4.7) разработанного ВП. Сравнение этих результатов показывает их удовлетворительное (качественное) совпадение, что подтверждает работоспособность ВП.

Частотные компоненты сигнала, показанного на рисунке 3.4.6, приведены в табл. 3.4.1, откуда видно, что результирующий сигнал - непериодический для любого интервала наблюдения.

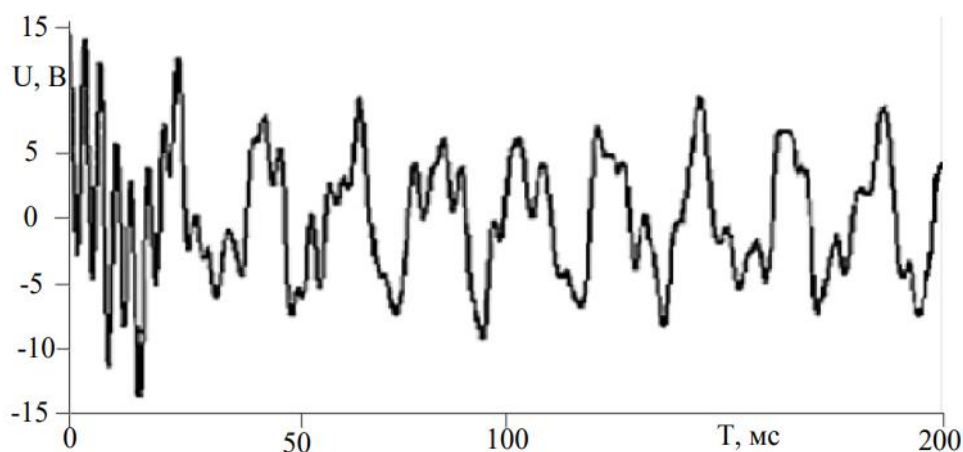


Рисунок 3.4.6 - Пример сигнала с интергармониками

Таблица 3.4.1. - Частотные компоненты сигнала, показанного в примере

Частота, Гц	Амплитуда, В
50	5
92	2
167	2
270	1
273	1
276	1
279	1
282	1
285	1
288	1
291	1

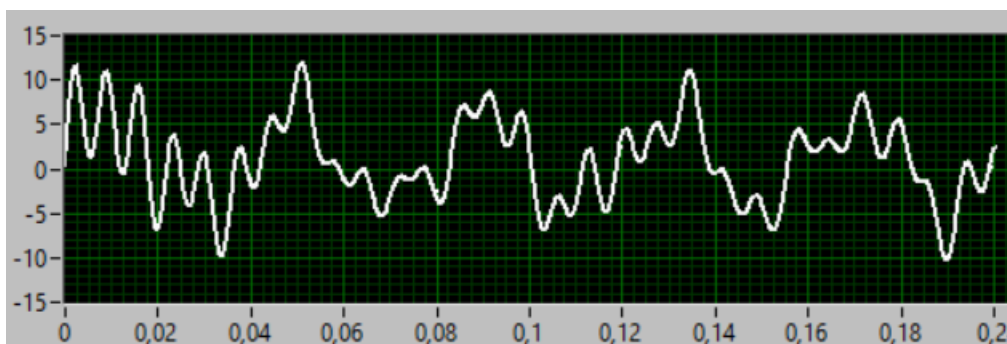


Рисунок 3.4.7 - Результат моделирования сигнала с интергармониками

Выводы по главе 3

1. Созданы модели нелинейного резистора и индуктивности. В процессе вычислительного эксперимента выявлена неустойчивость работы этих моделей при некоторых параметрах модели. В результате исследовать влияние степени нелинейности этих элементов цепи на гармонический состав тока в нем не было возможным. Использование RLC – шунта в моделях нелинейных элементов сняли эти трудности. В результате с помощью разработанных моделей нелинейных элементов цепи можно составлять схемы с этими элементами и исследовать их влияние на качество электрической энергии и влияние качества на потери мощности и энергии в элементах цепи.
2. Предложено аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник. Результат аналитического описания показал, что, на амплитуду одной интергармоники накладываются синусоидальные колебания усреднённой частотой модулированной амплитудой смещения, что дает значительное увеличение общей амплитуды. Этим результатом можно обосновать одно из возможных причин увеличение потерь в проводнике за счет возникновения дополнительных потерь мощности.
3. Разработан виртуальный прибор в среде LabVIEW для количественного и качественного анализа взаимодействий гармонических и интергармонических колебаний. Результат численного эксперимента и проведенный количественного анализа *позволил, прояснить еще одну возможной причины*

возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение) обусловленный с нелинейной нагрузкой. Результаты численного эксперимента на примере с частотными компонентами (50, 92, 167, 270, 273, 276, 279, 282, 285, 288, 291) [Гц] и соответственно амплитудными (220, 40, 40, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20) [В] показало, что такой причиной является появление постоянной составляющей в составе сигнала (ток, напряжение).

4. Численный эксперимент также показал, что сумма основной гармоники и интергармоник ведет себя как случайный процесс, тогда как каждая из слагаемых временных функций детерминированы.

5. Сопоставление результатов эксперимента из научных публикаций с результатом моделирования разработанного ВП показало их удовлетворительное (качественное) совпадение, что подтверждает работоспособность ВП. При этом видно, что результирующий сигнал - непериодический для любого интервала наблюдения.

ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВО ВНЕШНЕЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЕЕ КОНТРОЛЯ

На этапе проектирования необходимо решить вопросы улучшения параметров систем электроснабжения. Эти задачи решаются с помощью графиков электрических нагрузок (ГЭН) [110,с.142]: активной $P = P(t)$; реактивной $Q = Q(t)$; полной мощности $S = S(t)$; тока $I = I(t)$

Так как величины (P, Q, S, I) берутся как среднеарифметические показания приборов за промежутки времени от 1 до 60 минут, то ГЭН имеют форму ступеней и являются хронологических функциями, т.е. функциями текущего времени (рис. 4.1).

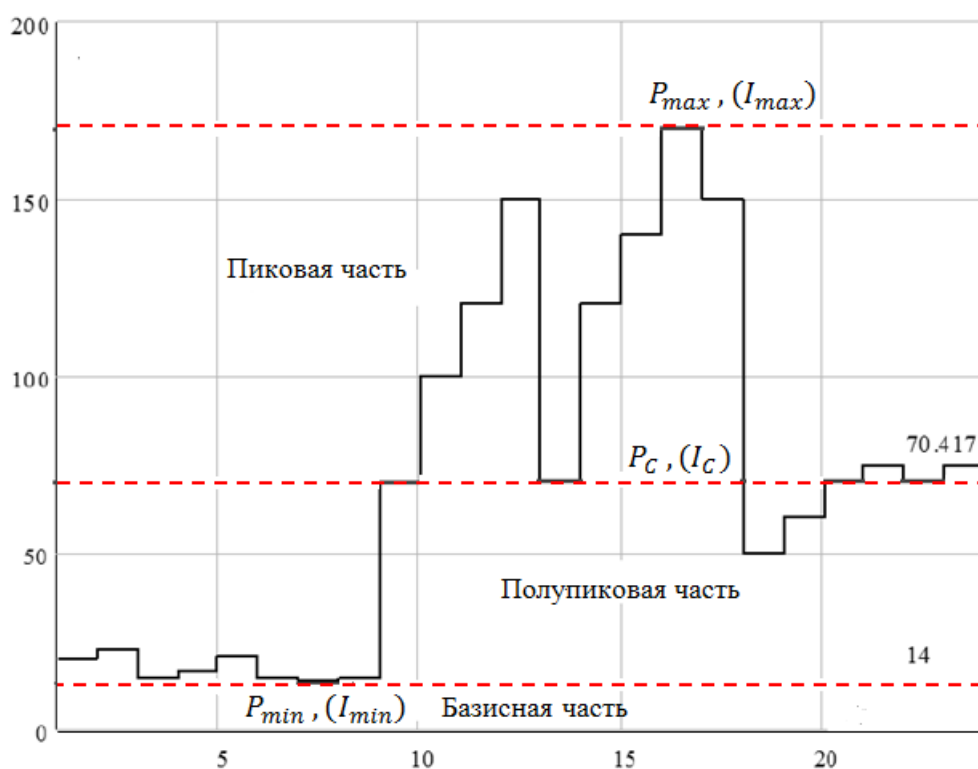


Рисунок 4.1 - Исходный хронологический график: $P(t)$ – кВт; t – ч

В ГЭН для удобства сравнительного анализа выделяют базисную, полупиковую и пиковую зоны. Границы этих зон определяются (рис. 4.1), следующими неравенствами: базисная $0 \leq P \leq P_{min}$; полупиковая $P_{min} \leq P \leq$

P_C и пиковая $P_C \leq P \leq P_{max}$, где P_{min} , P_C , P_{max} – соответственно минимальное, среднее и максимальное значения мощности.

В некоторых случаях, с целью облегчения математического анализа ГЭН, используют его упорядоченный вариант, где ступени располагаются в порядке убывания (рис.4.2).

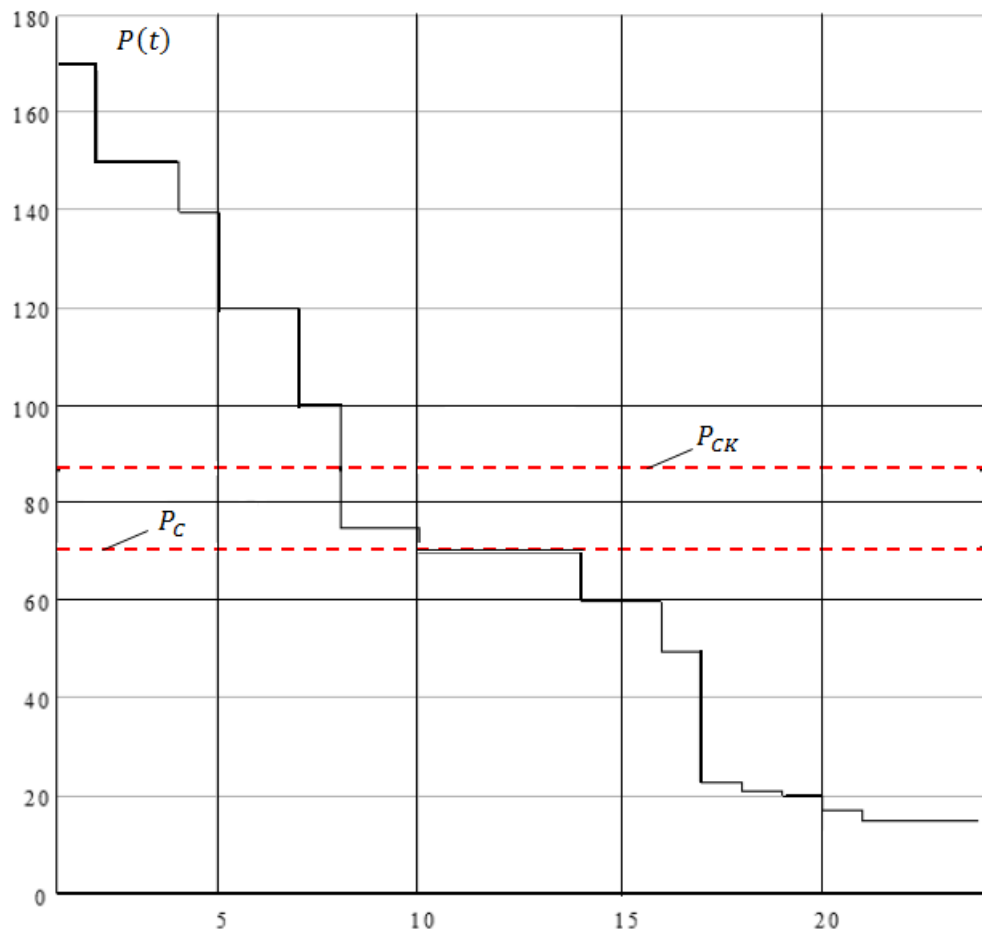


Рисунок 4.2 - Упорядоченный график нагрузки: $P(t)$ – кВт; t – ч; P_{CK}, P_C – соответственно среднеквадратичная и средняя мощности

Графики представленные на рисунках 4.3, 4.4, построены по данным, полученным на действующих предприятиях, они являются реальными [110,с.142].

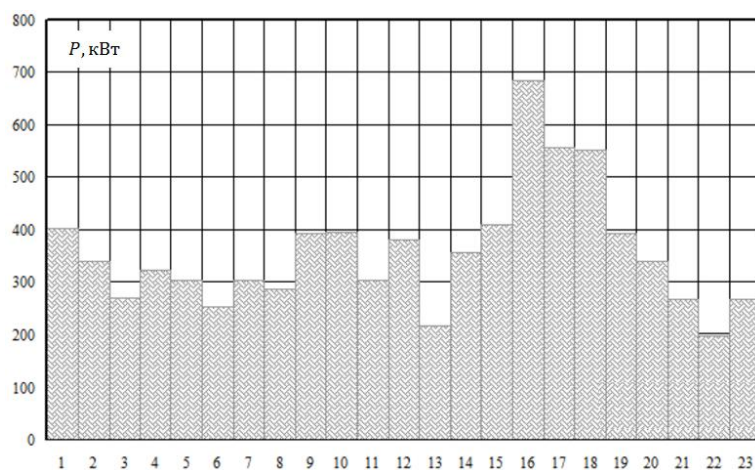


Рисунок. 4.3 – График нагрузки для цеха (с интервалом усреднения в 1 час)

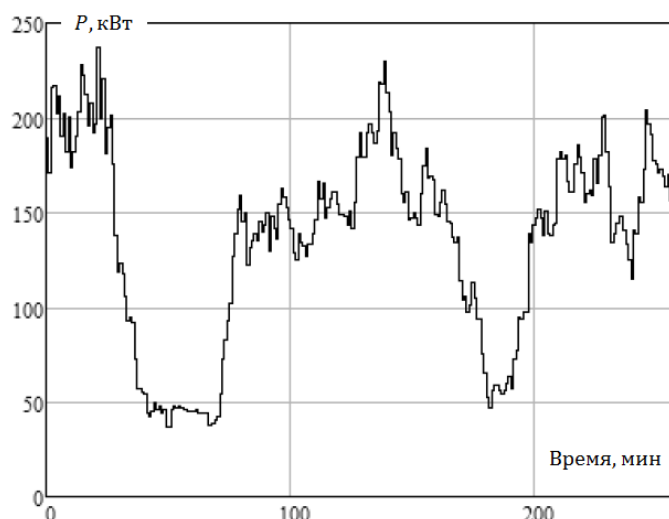


Рисунок 4.4 -График активной нагрузки для трансформаторной подстанции (с интервалом усреднения в 1,5 минуты)

В современных условиях при проектировании новых промышленных предприятий, на которых планируется выпуск изделий, основанных на новых технологических операциях, для решения возникших проектных задач широко используется технология компьютерного моделирования. Например, при заданных исходных данных график электрических нагрузок (рис.4.5) получают методом имитационного моделирования. На рисунке 4.5 представлен ГЭН, смоделированный виртуальным прибором в работе [111, с.122]. Как видно, амплитуда графика изменяется случайным образом, который соответствует заданному закону изменения амплитуды, однако, длительность ступенек

графика строго фиксирована и не изменятся во времени, тогда как в реальности она может также изменяться случайным образом, в соответствии с законом изменения технологического процесса моделируемого производства.

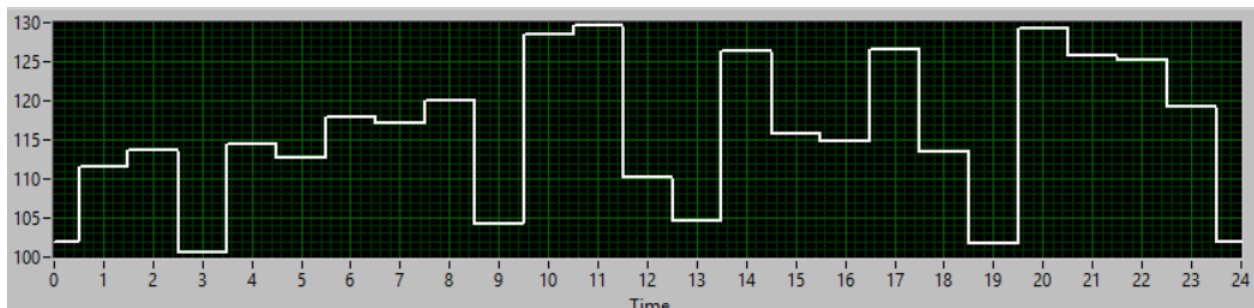


Рисунок 4.5 - Смоделированный график электрической нагрузки

Энергосберегающие мероприятия на промышленных предприятий проводятся для уменьшения значения ΔW , т.е. потерь во внешней сети, которые приводят к снижению оплаты за электроэнергию [106, с.78].

4.1. Методика определение потерь электроэнергии во внешней сети предприятия

Рассмотрим существующий способ оценки потерь электроэнергии в подходящей к предприятию линии которая обеспечивает его электроэнергией [106,с.78], а далее на основе ее анализа в целях автоматизации усовершенствуем эту методику. Для этого воспользуемся соответствующими программным и аппаратным обеспечениями программного комплекса LabVIEW.

Один из вариантов питающей сети предприятия имеет вид рисунок 4.1.1, где представлена часть типовой схемы внешнего электроснабжения потребителя.

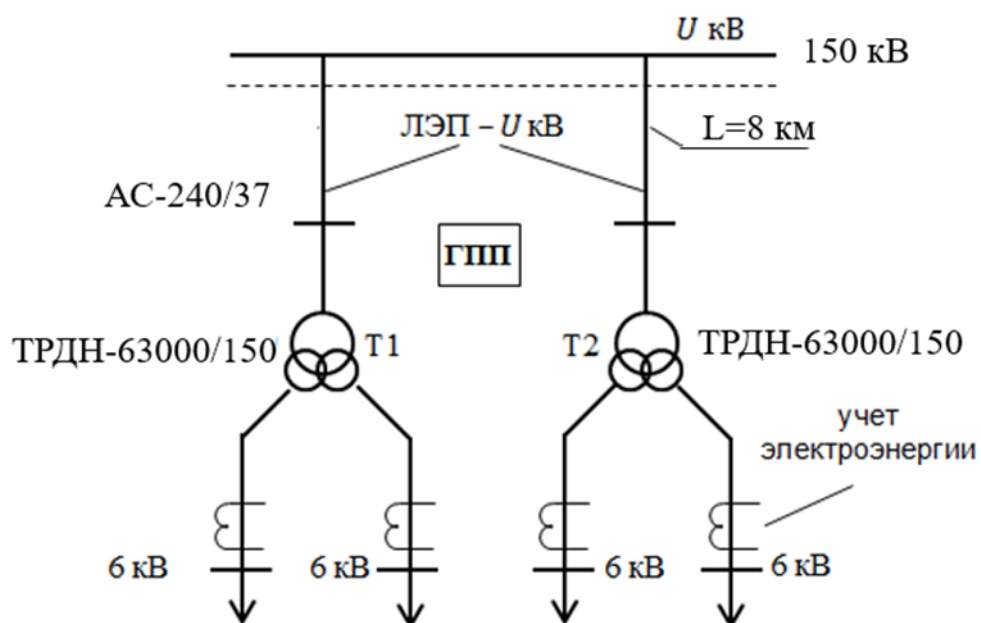


Рисунок 4.1.1 - Схема внешнего электроснабжения промпредприятия

Как видим, к главной понижающей подстанции (ГПП) подходят два отрезка воздушных линий электропередач. Все необходимые параметры элементов подстанции приведены на рисунке 4.1.1.

В [106, с.78] отмечено, что хотя в работе (Ю.С. Железко 1985; 1989) приведены необходимые материалы для расчётов и анализа потерь ЭЭ в сетях их практическое применение весьма скромны.

Кроме того, по нашему мнению, в методах расчета потерь ЭЭ используемые в сетях потребителей необходимо учитывать процессы, приводящие к возникновению интергармоник в токах, нагрузки.

По формулам, (таблице 4.1.1), оцениваются коэффициенты и величины для вычисления активных потерь энергии ($P\%$) в процентах по отношению к активной энергии W_p :

$$\Delta W_{p\%} = \frac{\Delta W_n + \Delta W_{xx} + \Delta W_k}{\Delta W_p} \cdot 100\%; \quad (4.1)$$

Значение W_p в формуле запоминается в счетчиках учета электроэнергии (обычно шины 6 -10 кВ).

Таблица 4.1.1. - Формулы определения числовых показателей ГЭН и потери электроэнергии [106 с.78]

1	Коэффициент заполнения графика полной нагрузки трансформатора	<p>T - время измерения электропотребления; потреблённая соответственно W_P - активная и W_Q - реактивная энергии; S_{max} - максимальная 30-минутная полная мощность, определяемая по формуле:</p> $S_{max} = \sqrt{P_{max}^2 + Q_{max}^2}$
	$K_3 = \left(\sqrt{W_P^2 + W_Q^2} \right) / (S_{max} \cdot T)$	
2	Коэффициент формы графика полной мощности нагрузки	$K_\phi^2 = (0,124/K_3 + 0,876)^2$
3	Нагрузочные активные потери энергии в трансформаторах и линиях электропередачи	<p>Активное сопротивление трансформатора R_T и участка линии электропередачи R_L приведены к среднему напряжению V_{cp} сети, в которой установлены приборы учета электроэнергии</p>
	$\Delta W_H = \frac{W_P^2 + W_Q^2}{V_{cp}^2 \cdot T} \cdot K_\phi^2 (R_T + R_L)$	
4	Потери электроэнергии на корону в линиях электропередачи 220 кВ и выше	<p>ΔP_{cp} - среднее значение удельных потерь мощности на корону для рассматриваемого региона, принимается по (Справочник..., 1985); l_Σ - суммарная длина линий</p>
	$\Delta W_k = \Delta P_{cp} l_\Sigma \cdot T$	
5	Потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах	<p>ΔP_{xx} - каталожные потери холостого хода трансформатора, n_T - количество трансформаторов</p>
	$\Delta W_{xx} = \Delta P_{xx} \cdot n_T \cdot T$	

Согласно существующей методике, величины W_P , W_Q входящие в строку 3 табл.4.1.1, определяются по показаниям счетчика электрической энергии. Коэффициент заполнения $K_3 = 0,85$ определяется по формуле (строка 1 (табл.4.1) путем анализа графиков подстанции, снятых в процессе эксплуатации предприятия. Коэффициент формы $K_\phi^2 = (0,124/0,85 + 0,876)^2 = 1,044$ вычисляется по формуле (строка 2 (табл.4.1.1). Далее

рассчитываются нагрузочные активные потери энергии в трансформаторах и линиях электропередачи W_p .

Итак, необходимые исходные данные для расчёта $\Delta W_{p\%}$ [106, с.78]:

$W_{p\Sigma} = 44020$ тыс. кВт · ч., $W_{Q\Sigma} = 12320$ тыс. квар · ч. (потребленные за месяц заводом электроэнергии);

$$- K_3 = 0,85$$

$$- K_{m1} = K_{m2} = 158/6,3$$

$$- \Delta P_{xx1} = \Delta P_{xx2} = 59 \text{ кВт}, \Delta P_{кз1} = \Delta P_{кз2} =$$

235 кВт (соответственно потери холостого хода и короткого замыкания);

- $S_{TH1} = S_{TH2} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ (полные мощности трансформаторов);

$$- R^* = 0,122 \text{ Ом/км}$$

- $U_1=158 \text{ кВ}, U_2=6,3 \text{ кВ}$ (первичные и вторичные напряжения трансформаторов);

$$- T = 31 \cdot 24 = 744 \text{ ч. (количество часов за месяц).}$$

Активные сопротивления силового трансформатора $R_T =$ и участка линии электропередачи R_l (строка 3, табл. 4.1) приведенные к среднему напряжению V_{cp} сети применительно к схеме рис.4.6, определяются по формулам:

$$R_{T1} = R_{T2} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_H^2}{S_{TH}^2} = \frac{235 \cdot 6,3^2}{63^2} = 0,0024 \text{ Ом.} \quad (4.2)$$

$$R_{л1} = R_{л2} = \frac{R^* \cdot l}{K_T^2} = \frac{0,122 \cdot 8}{(158/6,3)^2} = 0,0015 \text{ Ом.} \quad (4.3)$$

В этих формулах: $\Delta P_{кз}$ - потери короткого замыкания; U_H - номинальное среднее напряжение трансформатора на низкой стороне; S_{TH} - полная мощность трансформатора; R^* - погонный параметр провода ЛЭП; l – длина ЛЭП; K_T – коэффициент трансформации трансформатора.

Если эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных участков ЛЭП и трансформаторов ГПП (рис.4.6) равно

$$R_3 = \frac{(R_{T1} + R_{Л})}{2} = 0,002 \text{ Ом}, \text{ то процент неучтенных счетчиком потерь}$$

активной электроэнергии в них составит (4.1):

$$\Delta W_{p\%} = \frac{\Delta W_n + \Delta W_{xx} + \Delta W_k}{\Delta W_p} \cdot 100\% = \frac{147,75 + 87,79}{44020} \cdot 100\% = 0,54\%, \quad (4.4)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta W_n &= \frac{\Delta W_p^2 + \Delta W_Q^2}{V_{cp}^2 \cdot T} \cdot K_\phi^2 (R_T + R_{Л}) \\ &= \frac{44020^2 + 12320^2}{6,3^2 \cdot 744} \cdot 1,044 \cdot 0,002 = 147,75 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

Потери ΔW_{xx} холостого хода двух трансформаторов вычислим по формуле в строке 5 (табл.4.1) :

$$\Delta W_{xx} = \Delta P_{xx} \cdot n_T \cdot T = 59 \cdot 2 \cdot 744 = 87,79 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}; \quad (4.6)$$

Коронарные потери, как было отмечено выше, равны нулю, так как они потери учитываются в воздушных линиях с номинальным напряжением $U_H > 220$ кВ.

Анализ формул (4.1) и (строка 3, табл.4.1.1) показал что, связанные с величинами значения $\Delta W_{p\%}$ зависят от величин графика электрических нагрузок потребления активной ΔW_p и реактивной ΔW_Q энергий и коэффициента формы графика полной мощности K_ϕ , которые в общем случае изменяются по времени случайным образом. Поэтому при проведении уточняющих расчетов $\Delta W_{p\%}$ во внешней сети предприятия необходимо учитывать эти влияющие факторы. В тоже время в [106 с.78] показано, что

уточненные расчеты $\Delta W_{p\%}$ во внешней сети предприятия позволяют снизить оплату за электроэнергию. Следовательно, разработка инструментария для автоматизации исследования влияния различных факторов на величину $\Delta W_{p\%}$ является актуальной задачей.

4.2. Разработка инструментария в виде виртуального прибора для автоматизации определения коэффициента активных потерь в системе внешнего электроснабжения потребителя

Целью рассматриваемого раздела работы является дальнейшее расширение возможностей ВП, разработанного в работе [111, с.122] для моделирования графика электрических нагрузок (ГЭН). Предлагаемый ВП дополнен следующими подпрограммами (виртуальными подприборами), которые выполняют:

- статистическую обработку ГЭН с целью определения его числовых показателей;
- автоматизацию расчета коэффициента активных потерь $\Delta W_{p\%}$ в системе внешнего электроснабжения потребителя путем контроля тока нагрузки с использованием внешнего модуля сбора данных USB 6009.

Блок-диаграмма ВП, реализующего моделирование ГЭН, показана на рисунке 4.2.1. Видно, что моделирование графика на каждом шаге длительностью в единицу машинного времени реализуется с использованием библиотечного виртуального инструмента LabVIEW - Square Wave PtByPt_VI (рис.4.2.1), осуществляющего пошаговое генерирование прямоугольного колебания.

При этом текущее случайное значение амплитуды колебания прямоугольной формы, соответствующее значению параметра i внутреннего цикла, изменяющемуся в пределах $(1 \div 24)$ получается умножением

сгенерированного текущего случайного числа (СЧ) r из интервала (0-1) с помощью (Random Number (0-1)), на заданное значение возможного максимального значения тока нагрузки, например, равного $I_{max} = 100$ А (рис.4.2.1, d). В этом случае текущее значение тока нагрузки соответствует определенному количеству одновременно работающих электроприемников с заданными мощностями и изменяется случайным образом в диапазоне от нуля до I_{max} , подчиняется равномерному закону распределения. Если моделируемые процессы включения или отключения ЭП и их длительности работы или паузы подчиняются другому, отличному от равномерного, закону, то требуемый закон можно получить путем преобразования равномерного на другой закон путем использования известных расчетных соотношений [114 с.288].

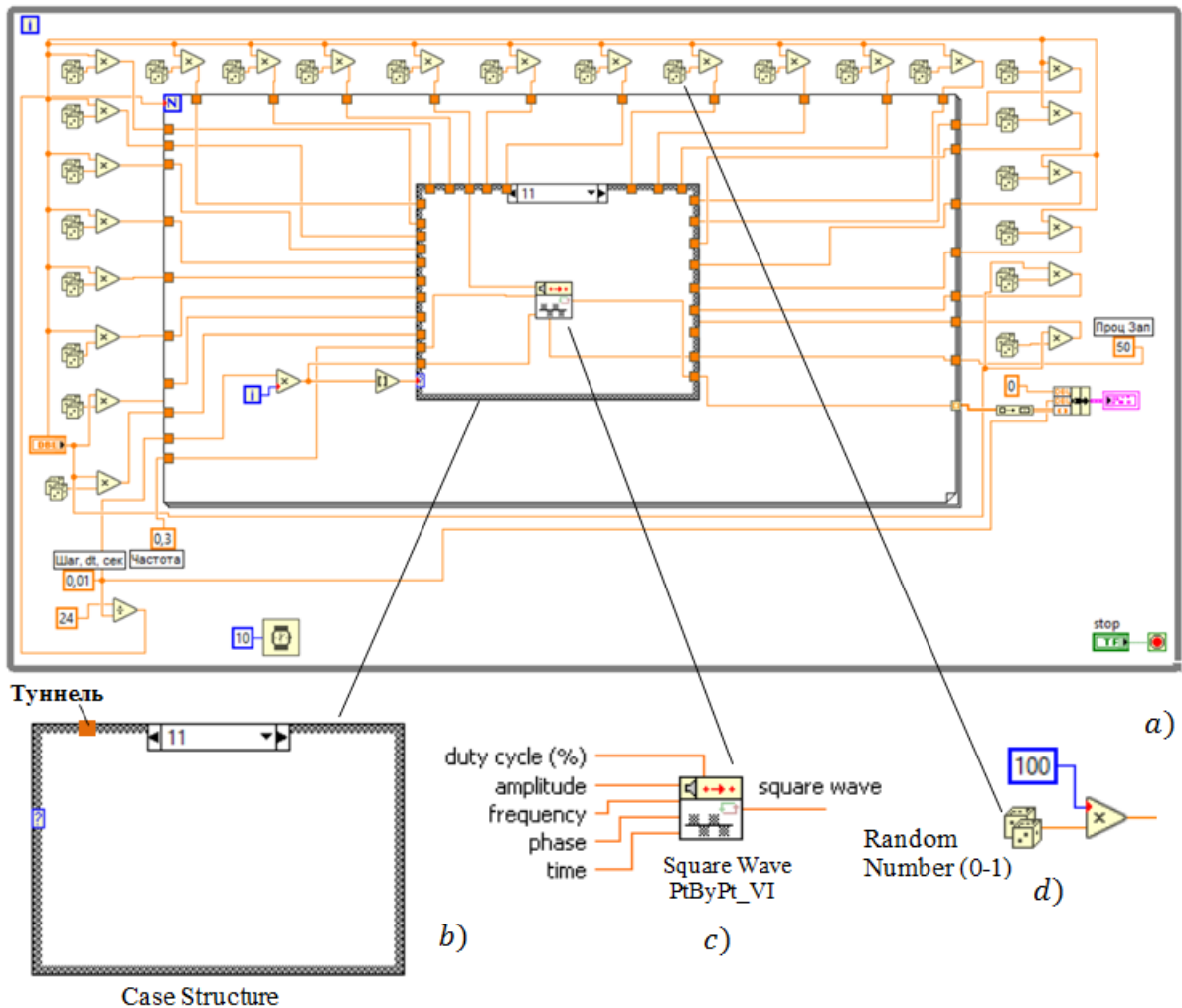


Рисунок 4.2.1 - Блок-диаграмма с исходным кодом ВП для моделирования ГЭН

В качестве примера ниже даны формулы преобразования для двух законов распределения [114 с.288]:

показательного

$$x = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln(r), \quad (4.2)$$

где λ – параметр показательного распределения, r – равномерно распределенное СЧ;

нормального

$$x = m + s \left[\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right], \quad (4.3)$$

m, s - параметры нормального распределения, r_i – равномерно распределенное СЧ.

Следует отметить, что максимальное значение тока нагрузки I_{max} может состоять из двух слагаемых: $I_{max} = I_{пос} + I_{пер}$. Первое слагаемое $I_{пос}$ - базисное ($0 \leq I \leq I_{min}$), а второе составлено из полупиковой $I_{min} \leq I \leq I_C$ и пиковой $I_C \leq I \leq I_{max}$ частей (рис.4.1).

Далее полученное текущее значение амплитуды прямоугольного колебания $I_{нагр}(t)$ вводится через границу рамочной структуры в цикл с фиксированным числом итераций (For Loops) сначала во внутреннюю область цикла и тут же в область структуры с выбором (CaseStructure), а затем на вход виртуального инструмента - Square Wave PtByPt_VI. В этом случае говорят, что значение $I_{нагр}$ выводится через «туннель», который в программе имеет вид квадрата на границе цикла и структуры выбора.

Описанный выше алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия реализуется блок – диаграммой (рис.4.2.1).

Для расширения функциональной возможности ВП (рис.4.8), позволяющего моделировать ГЭН с учетом случайности и частоты изменения текущей ширины прямоугольного участка ГЭН, добавлена та же функция Random Number (0-1), реализующая случайность входных данных виртуального инструмента - Square Wave PtByPt_VI, таких как frequency. Кроме того,

добавлены новые виртуальные инструменты и математические функции, позволяющие проводить статистическую обработку ГЭН, строить его упорядоченный вариант и определять следующие числовые показатели (ЧП):

- максимальный I_{max} , минимальный I_{min} значения тока нагрузки;
- средний ток I_C ;
- среднеквадратичный ток $I_{СК}$;
- коэффициент заполнения k_3 ;
- коэффициент формы k_ϕ ;
- коэффициент равномерности k_P .

Эти ЧП графика электрической нагрузки вычисляются соответственно по формулам [110]:

$$I_C = W_a/T = (\Delta t/n) \sum_{i=1}^n I_i, \quad (4.2)$$

где Δt - интервал усреднения нагрузки, n - число этих интервалов;

$$I_{СК} = \sqrt{(1/T) \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{(\Delta t/n) \sum_{i=1}^n I_i^2}; \quad (4.3)$$

$$k_3 = I_C/I_{max}; \quad (4.4)$$

$$k_\phi = I_{СК}/I_C; \quad (4.5)$$

$$k_P = I_{min}/I_{max}. \quad (4.6)$$

По этим значениям ЧП далее можно определить вероятностные параметры ГЭН – дисперсию D и среднеквадратичное отклонение DP , которые могут быть использованы для определения *потери электроэнергии*.

Диапазон изменения значений реальных числовых показателей ГЭН представлен на таблице 4.2.

Таблица 4.2.1 - Диапазон изменения значений реальных числовых показателей ГЭН [110 с.142]

Опыт эксплуатации показал, что значения реальных числовых параметров суточных и годовых графиков нагрузки промышленных предприятий, производственных цехов и участков в процессе эксплуатации изменяются в следующих пределах:	
Коэффициент заполнения - κ_z	0,4...0,95
Коэффициент формы - κ_ϕ	1,01...1,3
Коэффициент равномерности - κ_p	1,1...0,9
При идеально равномерном ГЭН (неизменная во времени нагрузка) $\kappa_z = \kappa_\phi = \kappa_p = 1$	

Суточный график, представленный на рис. 4.2.1, характеризуется следующими значениями коэффициентов: $\kappa_z = 0,414$, $\kappa_\phi = 1,214$, $\kappa_p = 0,1$

Результаты реализации выше перечисленных процедур по расширению функциональных возможностей ВП представлены на рис.4.2.2 (передняя панель), рисунке 4.2.3 (блок-диаграмм) прибора.

Полученный вариант ВП позволяет моделировать ГЭН, близкий к реальности, и следовательно, произвести более точное вычисление активных потерь энергии в процентах по отношению к активной энергии W_p .

На лицевой панели ВП (рис. 4.2.2) показаны элементы интерфейса, пронумерованные цифрами 1, ..., 8. Они предназначены для отображения полученных результатов моделирования (1, 2, 3) – графические индикаторы; (4,5) – одномерные массивы индикации числовых результатов моделирования; (6) – поля для ввода исходных данных; (7) – поля индикации полученных результатов моделирования; (8) – элемент управления работой ВП. При этом:

1. Смоделирован ГЭН;
2. Гистограмма $\Delta W_{p\%}$ - показывает частоту появления (высота



Рисунок 4.2.2. - Интерфейс ВП с расширенными функциональными возможностями

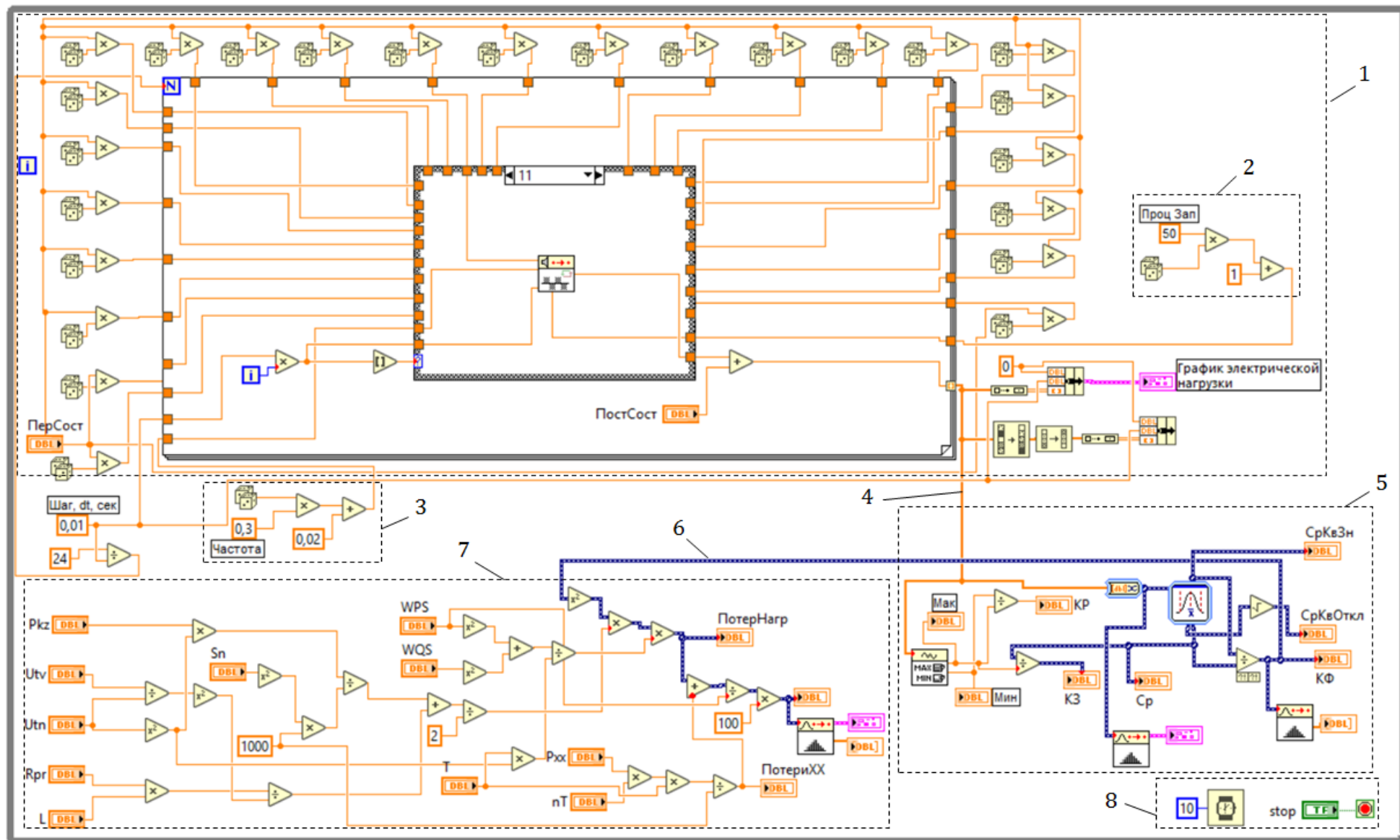


Рисунок 4.2.3 – Блок-диаграмма прибора с расширенными функциональными возможностями

каждого столбца) смоделированных значений $\Delta W_{p\%}$ в выбранном диапазоне его изменения. Количество столбцов – число выбранных диапазонов. Пунктирными линиями показано распределение Гаусса (нормальное распределение);

3. Гистограмма ГЭН. На ней пунктирными линиями отмечена двухступенчатость равномерного распределения частоты следования столбцов гистограммы, так как ГЭН состоит из базовой (неизменной) составляющей и переменной составляющей, подчиненной равномерному закону распределения;

4. Одномерный массив индикации зоны рассеяния значений $\Delta W_{p\%}$;

5. Одномерный массив индикации зоны рассеяния значений КФ;

6. Поля ввода значений для моделирования: nT – количество трансформаторов; U_{tv}, U_{tn} – напряжения трансформаторов высокой и низкой сторон; $P_{кз}, P_{хх}$ - потери короткого замыкания и холостого хода; WPS, WQS - суммарные в течении месяца потребления заводом активной и реактивной электроэнергии; S_n [МВ · А] – мощность трансформатора; R_{pr} [Ом/км] - погонный параметр ЛЭП; L [км] – длина воздушной линии; $T = 744$ ч. – длительность месяца в часах; ПостСост, ПерСост – соответственно базовая (неизменная) и переменная составляющие нагрузки.

7. Поля вывода значений результатов моделирования: max, min - максимальный, минимальный значения тока нагрузки; K_p - коэффициент равномерности; СрКвЗн – значение среднеквадратичного тока; Cp – значение среднего тока; СрКвОткл – среднеквадратичное отклонение тока; КЗ - коэффициент заполнения; КФ - коэффициент формы; ПотерНагр – нагрузочные потери; ПотериХХ – потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах; Проц неучт счетч потерь - % неучтенных счетчиком потерь активной электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП и воздушных линиях электропередач.

8. Кнопка управления.

Блок-диаграмма ВП (рис.4.2.3), как было сказано выше, предназначена чтобы создать программы для функционирования ВП, здесь все команды, операторы циклов и результаты для сравнения изображаются в виде графических обозначений. Все компоненты, из которых строятся виртуальные приборы, сами также являются виртуальными приборами.

На рисунке 4.2.3 выделены пунктирными линиями и пронумерованы объекты блок-диаграммы, имеющие определенные функциональные назначения. Например, 1 – для моделирования ГЭН; 2 – моделирует случайное изменение ширины столбцов ГЭН; 3 - моделирует случайное изменение частоты следования столбцов ГЭН; 4 - проводник данных, по которому передается массив данных в виде смоделированных ГЭН из 1 в 5, где производится статистическая обработка ансамбля ГЭН, вычисляются основные числовые параметры ГЭН и строятся гистограммы 2, 3 (рис.4.2.2); 6 - проводник данных для передачи текущего значения КФ в 7, где определяются нагрузочные потери, потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах, % неучтенных счетчиком потерь активной электроэнергии в трансформаторах ГПП и воздушных линий электропередач; 8 -элементы программы для управления ВП.

4.3. Сравнительный анализ результатов расчета и моделирования нагрузочной потери по существующему методу расчета и методу компьютерного моделирования

Результаты «ручного» расчета [106 с.78] величины $\Delta W_{p\%}$ по методике определения потерь электроэнергии во внешней сети предприятия на примере схемы его внешнего электроснабжения представлены в параграфе 4.1.

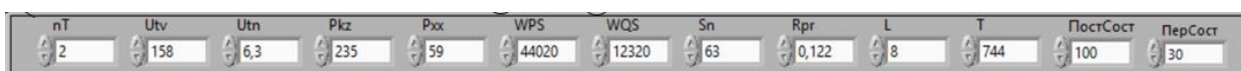
Значения $\Delta W_{P\%} = 0,54\%$, $\Delta W_H = 47.75$ тыс. кВт · ч. получены на основании обработки информации, поступившей от счетчиков электрической энергии.

Ограниченностью рассмотренного метода «ручного» расчета является то, что коэффициенты заполнения K_z и формы K_f графика полной мощности, в общем случае, изменяются во времени случайным образом, а значение $\Delta W_{P\%}$ зависит от этих коэффициентов, и при проведении уточняющих расчетов $\Delta W_{P\%}$ во внешней сети предприятия необходимо учитывать эти влияющие факторы.

В данном разделе работы для снятия отмеченного выше ограничения предложены два подхода:

- путем моделирования ГЭН, близкого к реальному графику;
- путем контроля тока нагрузки с использованием внешнего модуля сбора данных USB 6009 и разработкой соответствующего ВП.

Материалы первого подхода изложены в предыдущем параграфе 4.2, где описан алгоритм функционирования ВП с расширенными возможностями, который в процессе работы при заданных исходных данных:



выдает результаты моделирования, представленные на лицевой панели (рис.4.2.2), при этом текущий смоделированный ГЭН представлен на рисунке 4.3.1.

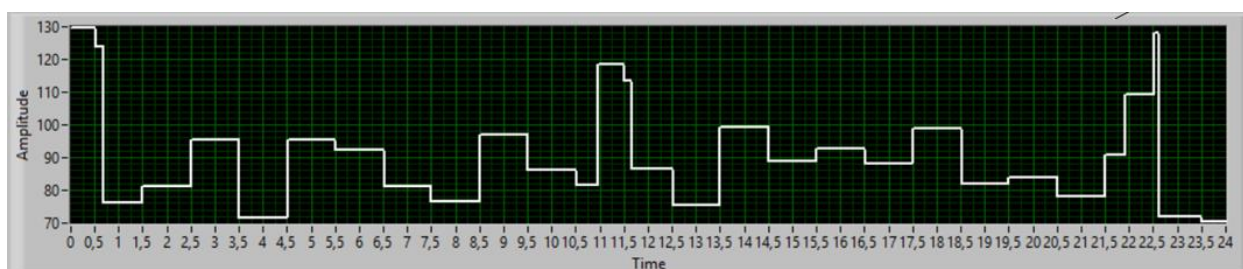


Рисунок 4.3.1- Текущий смоделированный ГЭН

Гистограмма, соответствующая этому ГЭН (рис.4.3.1), показана на рисунке 4.11. Как видно, она имеет двухступенчатое строение (выделено пунктирными линиями). Двухступенчатость объясняется тем, что ГЭН состоит из базовой (неизменной) составляющей и переменной составляющей, подчиненной равномерному закону распределения.

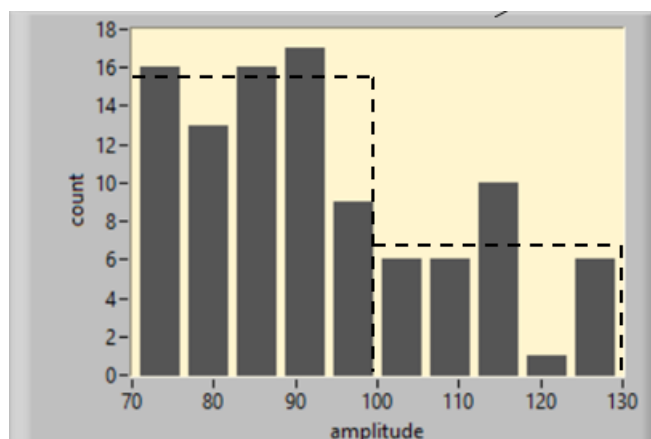


Рисунок 4.3.2. - Гистограмма ГЭН

Моделирование показало, что при изменении нагрузки по графику, показанному на рисунке 4.3.1, гистограмма $\Delta W_{p\%}$ в точках учета электроэнергии, приблизительно равна к нормальному распределению (пунктирная линия) (рис. 4.12). При этом ее значения распределены в диапазоне от 0,524194 ÷ 0,552994, тогда как результат «ручного» расчета равен $\Delta W_{p\%} = 0,54\%$. Это означает, что существующий метод дает только один из возможных значений $\Delta W_{p\%}$,

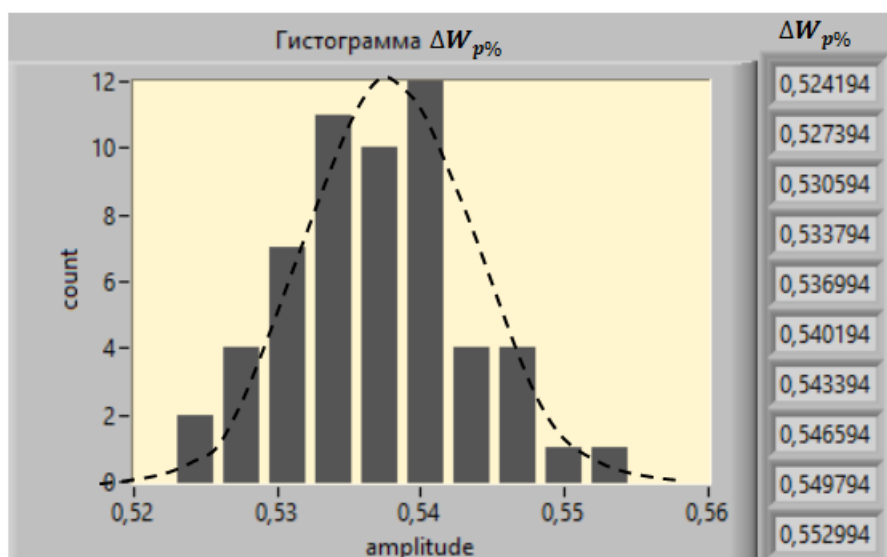


Рисунок 4.3.3 - Гистограмма $\Delta W_{p\%}$ и диапазон его изменения зависящих от коэффициента формы K_f графика полной мощности, в общем случае изменяется по времени случайным образом. Следовательно, метод компьютерного моделирования при решении рассматриваемой задачи позволяет дать более объективную картину изменения значения $\Delta W_{p\%}$ и точнее рассчитать его значение.

Рассмотрим второй подход снятия ограничения существующего метода.

Второй подход связан, как было сказано выше, с осуществлением контроля тока нагрузки с использованием внешнего модуля сбора данных USB 6009 и разработки соответствующего ВП. Пример использования этого модуля для измерения реального ГЭН мы уже рассматривали в параграфе - 1.3, стр. 37.

В системе LabVIEW для программирования работы измерительных **DAQ**-модулей имеется большой набор готовых ВП для обслуживания этих модулей. В нашем случае, когда не требуются расширенные возможности, можно очень просто запрограммировать с помощью экспресс-ВП **DAQ Assistant**.

Для автоматизации расчета коэффициента активных потерь $\Delta W_{p\%}$ в системе внешнего электроснабжения потребителя предлагается использовать

экспресс-ВП **DAQ Assistant** (рис.4.3.4), обеспечивающий программный интерфейс между аппаратной частью измерительного модуля USB 6009, подключенного с помощью USB – кабеля к ПК, и виртуальным прибором (ВП).

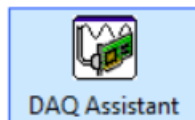


Рисунок 4.3.4 - Экспресс-ВП **DAQ Assistant**

Аппаратная часть схемы контроля тока нагрузки реализована с помощью соответствующих датчиков тока (трансформатор тока с измерительным шунтом), рисунке 4.3.5.

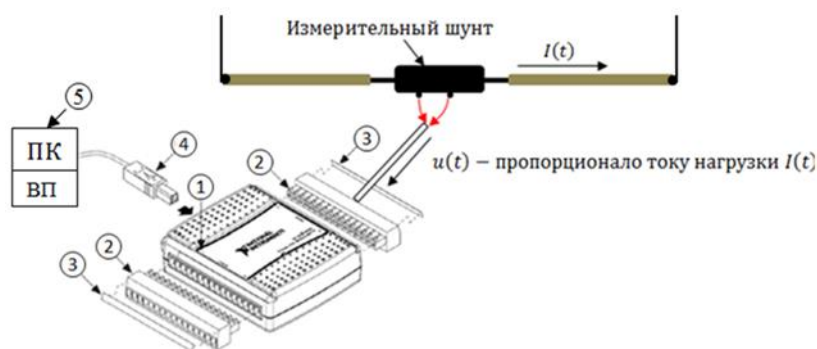


Рисунок 4.3.5 - Схема автоматического учета потребленной электроэнергии с помощью измерительного модуля USB 6009, получающего сигнал со стороны трансформатора тока (ТТ)

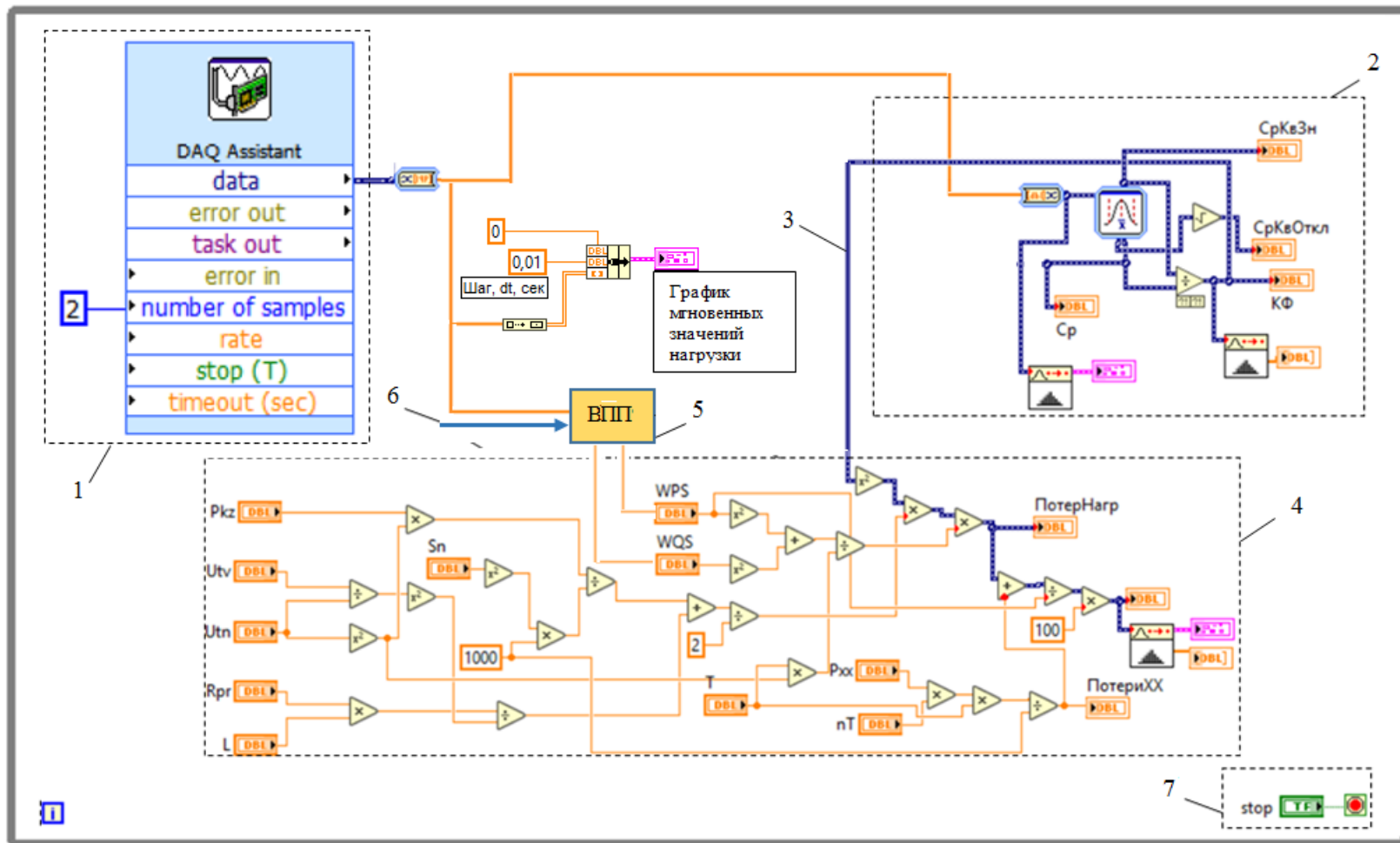


Рисунок 4.3.6 - Блок – диаграмма ВП с расширенными функциональными возможностями

На приведенных рисунках (4.3.5, 4.3.6) пронумерованные элементы имеют ниже следующие назначения. На рисунке 4.3.5: 1- DAQ модуль; 2 - клеммные колодки; 3 - этикетки с обозначением сигналов. DAQ модуль подключен к персональному компьютеру (ПК) - 5 с помощью USB – кабеля – 4. Информация о потребленной электроэнергии обрабатывается в ПК с помощью ВП.

На рисунке 4.3.6: 1 - экспресс-ВП **DAQ Assistant**; 2 – производит статистическую обработку сигнала, поступающего от элемента 1; 3 - проводник данных для передачи текущего значения K_{Φ} в 4; 5 – виртуальный подприбор (ВПП), где сигнал, полученный от 1, обрабатывается для получения значений активной (WPS) и реактивной (WQS) потребленной энергии в текущий момент измерения; 6 – сигнал, поступающий от трансформатора напряжения; 7 – блок управления ВП.

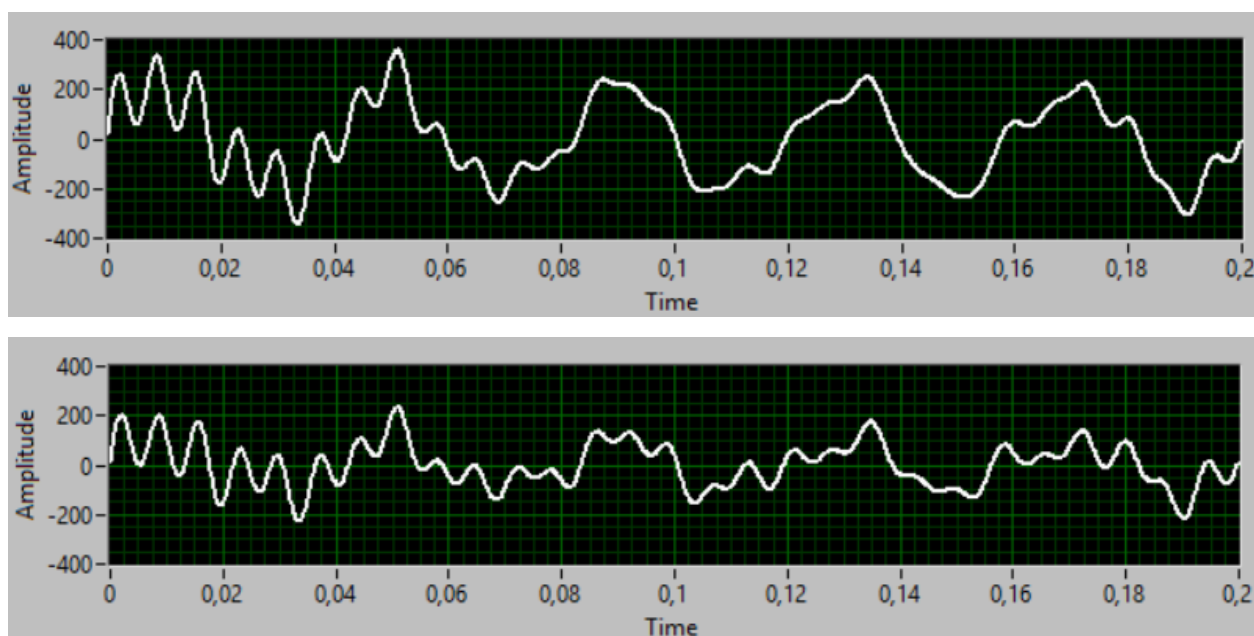


Рисунок 4.3.7 - Графики мгновенных значений нагрузки с выхода экспресс-ВП **DAQ Assistant** в отдельные моменты измерения

На рисунке 4.3.7. представлены виды возможных графиков мгновенных значений нагрузки с выхода экспресс-ВП **DAQ Assistant** в отдельные моменты измерения.

Выводы по главе 4

Важной составляющей энергосберегающих мероприятий промышленного предприятия является снижение потерь электроэнергии ΔW его внешней сети электроснабжения.

Для решения поставленных задачи главы 4 требуется моделирование близкой к реальному графику электрической нагрузки (ГЭН).

1. В современных условиях при проектировании новых промышленных предприятий, где планируется выпуск изделий, основанных на новых технологических операциях, для решения необходимых проектных задач широко используются технологии компьютерного моделирования, например, ГЭН получают методом имитационного моделирования при заданных исходных данных.

2. Анализ метода определения потерь электроэнергии его внешней сети электроснабжения (метод «ручного расчета») показал, что некоторые параметры, входящие в формулу расчета потерь, случайны, т.е. зависят от характера изменения во времени ГЭН. К ним относится коэффициент формы графика полной мощности. Фактор случайности не учитывается, при практическом применении этого метода, что является его ограниченностью. Для снятия такой ограниченности предлагается или определять потери на основании моделирования близкой к реальной ГЭН или путем контроля тока нагрузки с использованием внешнего модуля сбора данных USB 6009 и разработкой соответствующего ВП.

3. Разработан ВП, позволяющий рассчитать активные потери энергии во внешней сети электроснабжения предприятия в процентах $\Delta W_{p\%}$ по отношению к активной энергии W_p . При этом значения $\Delta W_{p\%}$ распределены в диапазоне от $0,524194 \div 0,552994$, тогда как результат «ручного» расчета $\Delta W_{p\%} = 0,54\%$, а закон распределения близок к нормальному распределению.

4. В системе внешнего электроснабжения потребителя разработан инструментальный для автоматизации расчета коэффициента активных потерь $\Delta W_{p\%}$, содержащий измерительный модуль USB 6009, подключенный к ПК с

помощью USB – кабеля, в качестве аппаратной составляющей, и ВП- в качестве программной составляющей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований заключаются в следующем:

1. Анализ научной литературы показал, что в современных промышленных и бытовых сетях возникают высшие гармоники и интергармоники связанные с нелинейными нагрузками, которые в предыдущих сетях практически отсутствовали или занимали малую долю от общей нагрузки. При этом экономические ущербы от гармонических и интергармонических составляющих нагрузок значительны.
2. Анализ научной литературы также показал, что в них не затрагиваются вопросы разработки способа устанавливающая взаимосвязь между видом вольтамперной характеристики нелинейных элементов электрической сети, с составом генерируемых ими спектра высших гармоник включая интергармоники.
3. Отмечено, что одним из перспективных методов решения выше отмеченных задач является использование компьютерных методов моделирования с использованием программных сред: LabVIEW, MATLAB (Simulink / SimPowerSystems).
4. На базе программного комплекса Matlab/Simulink/SimPowerSystems разработана структурная схема в среде Simulink и имитационная модель (ИМ) исследуемой промышленной сети в среде SimPowerSystems. ИМ позволяет воспроизвести работу электротехнических устройств во временной области, а также выполнять различные виды их анализа по определению добавочных потерь электроэнергии в исследуемой сети от гармонических и интергармонических составляющих в нагрузочном токе.
5. Разработанные компьютерные модели нелинейных элементов (НЭ) позволило исследовать, влияние вида характеристик НЭ на спектральный состав сгенерированных ими высших гармоник включая и интергармоники.
6. Предложено аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник. Результат аналитического описания показал, что, на амплитуду одной интергармоники накладываются синусоидальные колебания

усреднённой частотой модулированной амплитудой смещения, что дает значительное увеличение общей амплитуды. Этим результатом можно обосновать одно из возможных причин увеличение потерь в проводнике за счет возникновения дополнительных потерь мощности.

7. На базе графической среды программирования LabVIEW, разработан инструментарий для моделирования мгновенных значений тока нагрузки с высшими гармониками и интергармониками с возможностью статистической их обработки и оценки потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети. Результаты численного эксперимента и их графическое представление, а также статистическая обработка полученных результатов позволили, установить еще одну из возможных причин возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение) обусловленную нелинейной нагрузкой.

8. Результаты численного эксперимента показали, что когда на каноническую гармонику накладываются, ряд интергармоник одной из причин увеличение потерь мощности, за счет добавочных потерь связан с появлением постоянной составляющей в составе сигнала (ток, напряжение). Численный эксперимент проводился на примере сигнала состоящих из следующих частот (50, 92, 167, 270, 273, 276, 279, 282, 285, 288, 291) [Гц] с соответствующими амплитудными значениями (220, 40, 40, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20) [В]. Как известно, когда несинусоидальность обусловлена только гармониками, кратные 50 Гц, постоянная составляющая отсутствует, разумеется, при отсутствии постоянной составляющей в исходном несинусоидальном сигнале.

9. Численный эксперимент также показал, что сумма основной гармоники и интергармоник ведет себя как случайный процесс, тогда как каждая из слагаемых временных функций детерминированы. Интересным является тот факт, что при отсутствии некоторых интергармоник (276 Гц выше приведенном примере) процесс преобразуется в устойчивую функцию со случайно изменяющейся амплитудой в сторону возрастания времени и представляющей одну из реализаций случайного процесса.

10. Сопоставление результатов эксперимента из научных публикаций с результатом моделирования разработанного ВП показало их удовлетворительное (качественное) совпадение, что подтверждает работоспособность ВП.

11. Разработан ВП для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия, с учетом, что в составе нагрузочного тока возможны интергармоники.

Разработанные в виде ВП инструментальные средства исследования дополнительных потерь мощности в элементах электрической сети имеют потенциальные возможности дальнейшего развития. Направление их развития зависит от тех возможных потребителей электроэнергии, которые могут ухудшать качество электроэнергии. Эти потребители, как правило, являются источниками высших гармоник или интергармоник.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жежеленко, И. В.** Основные положения и принципы комплексного подхода к определению расчетных характеристик графиков электрических нагрузок [Текст] / И. В. Жежеленко, В. П. Степанов // Промышл. энергетика. – 1988. – № 4. – С. 38-41.
2. **Зыкин, Ф. А.** Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии [Текст] / Ф. А. Зыкин // Электричество. – 1987. – № 12. – С. 32-33.
3. Профессиональный анализ качества электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://test-energy.ru/analiz-kachestva-elektroenergii/>. – Загл. с экрана.
4. **Кучумов, Л. А.** Учет направления потока мощностей гармонических составляющих при определении энергетических показателей вентильного электропривода [Текст] / Л. А. Кучумов, М. К. Лукина, Л. В. Спиридонов // Материалы VIII науч.-техн. конф. по вопросам автоматизации производства. – Томск, 1974. – Т. 3. – С. 36-37.
5. **Кучумов, Л. А.** Вопросы измерения и учета добавочных потерь в сетях при некачественной электроэнергии [Текст] / Л. А. Кучумов, Л. В. Спиридонова // Вопросы надежности и экономичности систем электроснабжения. – М., 1974. – С. 102-106.
6. **Зыкин, Ф. А.** Измерение и учет электрической энергии [Текст] / Ф. А. Зыкин, В. С. Каханович. – М.: Энергоиздат, 1982. – 104 с.
7. **Зыкин, Ф. А.** Измерение мощности в системе электроснабжения переменного-периодических нагрузок [Текст] / Ф. А. Зыкин, И. О. Карпов // Изв. вузов. Энергетика. – 1982. – № 3. – С. 26-30.
8. **Мельников, И. А.** Реактивная мощность в электрических сетях [Текст] / И. А. Мельников. – М.: Энергия, 1975. – 128 с.
9. **Железко, Ю. С.** О стимулировании повышения качества электроэнергии в действующих электрических сетях [Текст] / Ю. С. Железко //

- Промышл. энергетика. – 1984. – № 2. – С. 53-56.
10. **Гапиров, Р. А.** Нормирование интергармоник как показателя качества электроэнергии в России и за рубежом [Текст] / Р. А. Гапиров, Д. С. Осипов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 284.
 11. **Тернер, Э.** Испытания на ЭМС: стандарты и их применения [Текст] / Э. Тернер // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2011. – № 4. – С. 88-90.
 12. **Лыгин, И. В.** Устройство съёма данных для контроля качества электроэнергии на базе multifunctional счётчиков [Текст] / И. В. Лыгин // Электрика. – 2009. – № 10. – С. 17-19.
 13. **Артюшенко, В. М.** Повышение качества электропитания в автоматизированной системе контроля и учета электроэнергии [Текст] / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова, С. А. Шляхтин // Электротехн. и информ. комплексы и системы. – 2008. – № 1. – С. 3-15.
 14. **Дмитриенко, А. Г.** Системы контроля показателей качества электроэнергии распределенных энергосистем [Текст] / А. Г. Дмитриенко // Соврем. информ. технологии. – 2009. – № 10. – С. 49-50.
 15. **Кубарев, Д. В.** Интерполяционные методы обработки сигналов в устройствах контроля качества электроэнергии нового поколения [Текст] / Д. В. Кубарев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – № 3. – С. 26–29.
 16. Оценка работы фильтров в системе электроснабжения горнодобывающего предприятия по результатам контроля качества электроэнергии [Текст] / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Н. М. Кузнецов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 7. – С. 16–19.
 17. Повышение точности средств измерения системы контроля показателей качества электроэнергии стартового комплекса [Текст] / А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев // Изв. вузов.

- Поволж. регион. Техн. науки. – 2012. – № 2. – С. 69–80.
18. **Шиганов, А. А.** Новые приборы контроля качества электроэнергии [Текст] / А. А. Шиганов // Гл. энергетик. – 2008. – № 10. – С. 29–32.
 19. **Калинников, К. Ю.** Система непрерывного контроля качества электроэнергии как элемент построения измерительных систем контроля качества и энергосбережения электроэнергии промышленного предприятия и электросетевой компании [Текст] / К. Ю. Калинников, Е. В. Ильяшенко // Энергетик. – 2013. – № 4. – С. 45–52.
 20. **Дубинин, В. В.** Контроль показателей качества электроэнергии в промышленных электрических сетях [Текст] / В. В. Дубинин, А. Н. Попов // Ползун. вестн. – 2013. – № 4-2. – С. 66-71.
 21. **Бондарев, В. А.** Оценка основных факторов энергосбережения [Текст] / В. А. Бондарев, А. С. Семёнов // Соврем. наукоем. технологии. – 2014. – № 5–1. – С. 228-229.
 22. **Наумчук, В. Ю.** Организация контроля качества электрической энергии на розничных рынках электроэнергии [Текст] / В. Ю. Наумчук, Н. В. Савина // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 7 (90). – С. 116-121.
 23. **Савина, Н. В.** Эксплуатационный контроль качества электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Н. В. Савина, Т. С. Козлова // Вестн. Амур. гос. ун-та. Сер. Естеств. и экон. науки. – 2007. – № 37. – С. 67-76.
 24. Техничко-экономическое обоснование внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах горных предприятий [Текст] / О. В. Федоров, А. С. Семёнов, А. Н. Егоров, В. М. Хубиева // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2016. – № 9-10. – С. 91–97.
 25. **Семенов, А. С.** Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике [Текст] / А. С. Семенов, Н. М. Кузнецов // Измер. техника. – 2014. – № 4. – С. 31-34.
 26. Анализ показателей качества электрической энергии при работе

- асинхронного двигателя от трёхфазного источника питания [Текст] / А. С. Семёнов, Г. А. Матул, Р. Р. Хазиев [и др.] // Фундам. исслед. – 2014. – № 9-6. – С. 1210-1215.
27. **Semenov, A. S.** Development of monitoring system for measuring the quality of electrical energy on the mining industry [Text] / A. S. Semenov // Applied and Fundamental Studies. Proceedings of the 1st International Academic Conference. Edited by Yan Maximov. – 2012. – P. 301-304.
28. **Semenov, A. S.** An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine [Text] / A. S. Semenov, N. M. Kuznetov // Measurement Techniques. – 2014. – P. 417-420.
29. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий [Текст]: моногр. / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Н. М. Кузнецов, А. С. Семёнов. – М.: Перо, 2013. – 144 с.
30. **Мясоедов, Ю. В.** Автоматизированный контроль показателей качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий [Текст] / Ю. В. Мясоедов // Вестн. Амур. гос. ун-та. Сер. Естеств. и экон. науки. – 2007. – № 37. – С. 61-67.
31. **Пономаренко, И. С.** Инструментальный контроль показателей качества электроэнергии в электрических сетях при переходе на новый ГОСТ (стандарт) [Текст] / И. С. Пономаренко, О. И. Пономаренко, О. В. Большаков // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2015. – № 3 (68). – С. 5-10.
32. Повышение экономической эффективности работы распределительных электрических сетей за счёт снижения коммерческих потерь электроэнергии и организации контроля её качества [Текст] / И. С. Пономаренко, О. В. Дичина, А. Ю. Скорняков [и др.] // Энергетик. – 2014. – № 8. – С. 24-29.
33. **Зеленкова, Л. И.** Методика мониторинга качества электроэнергии в электросетях [Текст] / Л. И. Зеленкова // Гл. энергетик. – 2015. – №1. –

- С. 35-40.
34. Качество электрической энергии и технологии его мониторинга [Текст] / В. С. Иващенко, Л. Л. Хруслов, С. И. Киреев [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2008. – № 5. – С. 4-9.
35. **Кривоногов, С. В.** Анализ эффективности систем управления электроснабжением [Текст] / С. В. Кривоногов // Карел. науч. журн. – 2015. – № 1 (10). – С. 179-182.
36. **Кузнецов, Н. М.** Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях [Текст] / Н. М. Кузнецов, А. С. Семёнов // Фундам. исслед. – 2013. – № 4-2. – С. 295-299.
37. Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника [Текст] / Н. М. Кузнецов, А. С. Семенов, Ю. В. Бебихов, А. В. Рыбников // Гор. журн. – 2014. – № 1. – С. 23-26.
38. **Плахотнюк, А. Н.** Возможные перспективы развития современных средств измерения качества электроэнергии [Текст] / А. Н. Плахотнюк, Ю. А. Дудник // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 3. – С. 22-23.
39. **Кузнецов, Н. М.** Влияние электропривода с вентильным преобразователем на качество электрической энергии [Текст] / Н. М. Кузнецов, О. В. Федоров // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2010. – № 7. – С. 21.
40. **Фёдоров, О. В.** Измерение и анализ показателей качества электроэнергии учебно-лабораторного корпуса [Текст] / О. В. Фёдоров, А. С. Семенов, А. Н. Егоров // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы докл. II Поволж. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 414-420.
41. **Матул, Г. А.** Измерения качества электроэнергии в образовательных

- учреждениях [Текст] / Г. А. Матул, А. Н. Егоров, Ю. В. Бебихов // *Международ. студ. науч. вестн.* – 2017. – № 4, ч. 2. – С. 149-152.
42. **Семёнов, А. С.** Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от преобразователя частоты [Текст] / А. С. Семёнов, В. А. Бондарев // *Фундам. исслед.* – 2016. – № 4-1. – С. 112-117.
43. ГОСТ 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная [Текст]: нормы качества электр. энергии в системах электроснабжения общ. назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. –16 с.
44. Искажение формы питающего напряжения в сетях электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей [Текст] / А. Е. Козуряк, Н. М. Кузнецов, О. В. Федоров, А. О. Свириденко // *Горное оборудование и электромеханика.* – 2011. – № 6. – С. 30-35.
45. **Фёдоров, О. В.** Энергоэффективность зданий в аспекте энергосберегающего управления [Текст] / О. В. Федоров, Н. В. Голубцов // *Электротехн. системы и комплексы.* – 2012. – № 20. – С. 332-342.
46. **Федоров, О. В.** Влияние электротехнических комплексов с несинусоидальной характеристикой на систему электроснабжения [Текст] / О. В. Федоров, А. Г. Немцев // *Вестн. Чуваш. ун-та.* – 2012. – № 3. – С. 166-174.
47. **Malyshev, Yu.** Analysis of automatic control systems of self-contained electric stations [Text] / Yu. Malyshev, O. Fedorov // *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University.* – 2013. – № 4. – P. 3.
48. **Fedorov, O.V.** Alternative energy sources for remote customers [Text] / O. V. Fedorov, M. M. Kuznetsov // *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University.* – 2015. – № 6 (123). – P. 141-144.
49. **Fyodorov, O.** Electromagnetic compatibility of starting devices for ac electric drives with power supply network [Text] / O. Fyodorov, A. Sarvarov, M. Petushkov // *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University.*

- 2015. – № 4. – Р. 17-19.
50. **Семёнов, А. С.** Контроль качества электроэнергии и анализ полученных результатов при измерении напряжения [Текст] / А. С. Семёнов, В. А. Бондарев, С. А. Заголило // Фундам. исслед. – 2017. – № 9. – С. 86-92.
51. **Карташев, И. И.** Автоматизация управления качеством электроэнергии, методическое и инструментальное обеспечение [Текст] / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов // Вестн. Моск. энергет. ин-та. – 2001. – № 5. – С. 6-11.
52. **Ситати, С. С.** Разработка методики расчетной оценки качества электроэнергии в ЭЭС (на примере Кении) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С. С. Ситати. – М., 2000. – 171 с.
53. **Шидловский, А. К.** Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А. К. Шидловский, Г. Я. Вагин, Э. Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.: ил.
54. Электрические нагрузки промышленных предприятий [Текст] / С. Д. Волобринский, Г. М. Каялов, П. Н. Клейн [и др.]. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
55. **Ермаков, В. Ф.** Исследование процессов в электрических сетях: методы, средства, детерминированные и вероятностные модели [Текст] / В. Ф. Ермаков. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 2003. – 288 с.
56. **Ермаков, В. Ф.** Автомат для выбора токопроводов по нагреву [Текст] / В. Ф. Ермаков // Промышл. энергетика. – 1992. – № 7. – С. 30-32.
57. Пат. № 2079886 РФ, МПК G06G 7/62. Устройство для моделирования изменения мощности нагрузки и температуры токоведущих элементов систем электроснабжения [Текст] / В. Ф. Ермаков (РФ). – № 94021099/09; заявл. 06.06.94; опубл. 20.05.97, Бюл. № 14.
58. Оценка влияния качества электроэнергии на потери мощности в элементах электрической сети на основе компьютерного моделирования [Текст] / Ч. М. Бузурманкулова, А. К. Кадиева, Э. Б. Исакеева [и др.] //

- Проблемы автоматизации и управления. – 2019. – № 2 (37). – С. 117-125.
59. Моделирование несинусоидальных режимов воздушных линий для расчета потерь мощности в них [Текст] / Ч. М. Бузурманкулова, А. Р. Айдарова, Э. Б. Исакеева, Ж. К. Абдыбаева // Проблемы автоматизации и управления. – 2019. – № 1 (36). – С. 58-64.
60. Лабораторная установка для измерения потерь мощности в элементах электросети при стохастическом режиме работы электроприемников [Текст] / Ч. М. Бузурманкулова, А. Р. Айдарова, А. Б. Калмурзаев, Н. А. Суянтбекова // Проблемы автоматизации и управления. – 2020. – № 2 (39). – С. 33-42.
61. **Бузурманкулова, Ч. М.** Численное интегрирование дифференциального уравнения перегрева жил токопроводов относительно температуры окружающего мира в среде LabVIEW [Текст] / Ч. М. Бузурманкулова // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 2 (41). – С. 11-17.
62. Анализ возможности идентификации места обрыва воздушной линии электропередачи, выполненной на основе провода нового типа [Текст] / Г. Ш. Эралиева, Г. Н. Ниязова, Ч. М. Бузурманкулова, Ж. А. Сулайманова // Проблемы автоматизации и управления. – 2022. – № 2 (44). – С. 77-84.
63. **Бузурманкулова, Ч. М.** Возможные пути сглаживания графика электрических нагрузок г. Бишкек [Текст] / Ч. М. Бузурманкулова // Современные тенденции развития науки и технологий: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород, 2016. – С. 8-11.
64. **Балаш, В. А.** Имитационное моделирование и его приложения [Электронный ресурс] / В. А. Балаш, О. С. Кузнецова, С. Н. Купцов. – Режим доступа: <http://simulation.su/uploads/files/default/2008-balash-kuznezova-kuptshov-sm.pdf>. – Загл. с экрана.
65. **Каялов, Г. М.** Расчетная нагрузка фидера электрической сети и ее вычисление для заданного графика [Текст] / Г. М. Каялов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1961. – № 4. – С. 114-131.

66. **Ус, А. Г.** Электроснабжение промышленных предприятий и гражданских зданий [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Ус, Л. И. Евминов. – Мн.: Пион, 2002. – 457 с.
67. **Ермилов, А. А.** Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А. А. Ермилов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.: ил.
68. Указания по расчету электрических нагрузок. РТМ 36.18.32.4-92 [Электронный ресурс] / ВНИПИ; Тяжпромэлектропроект. – Режим доступа: <https://profsector.com/media/catalogs/57ea1c8c988b2.pdf>. – Загл. с экрана.
69. **Кудрин, Б. И.** Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] / Б. И. Кудрин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
70. **Тимчук, С. А.** Определение потерь электроэнергии в зависимости от ее качества в нечеткой форме в сельских распределительных сетях [Текст] / С. А. Тимчук, А. А. Мирошник // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2015. – Т.1, № 8 (73). – С. 4-10.
71. **Боровиков, В. С.** Оценка добавочных потерь активной мощности и электроэнергии в линиях с высоким коэффициентом искажения синусоидальности тока [Электронный ресурс] / В. С. Боровиков, Н. Н. Харлов. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2010/K02/1001.pdf>. – Загл. с экрана.
72. **Боровиков, В. С.** О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии [Текст] / В. С. Боровиков, Н. Н. Харлов, Т. Б. Акимжанов // Изв. Том. политехн. ун-та. – Томск, 2013. – Т. 322, № 4: Энергетика. – С. 91-93.
73. **Айдарова, А. Р.** Исследование влияния различных факторов на величину нагрузочных потерь энергии в элементах электрической сети [Текст] / А. Р. Айдарова, Д. Ж. Байбагысова, Г. К. Усубалиева // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – № 1 (28). – С. 61-66.

74. **Айдарова, А. Р.** Решение задач моделирования при исследовании потерь в элементах электрической сети с применением Labview [Текст] / А. Р. Айдарова, Д. Ж. Байбагысова, А. Кадиева // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – № 1 (28). – С. 67-71.
75. **Карташев, И. И.** Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения [Текст] / И. И. Карташев; под ред. М. А. Калугиной. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 120 с.
76. **Железко, Ю. С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии [Текст]: рук. для практ. расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
77. Создание имитационной модели для выявления искажений форм кривых токов и напряжений в сетях рудников [Текст] / А. А. Массов, П. М. Козлов, Б. Х. Кумаритов, И. В. Кирилин // Промышл. энергетика. – 2011. – № 5. – С. 44-49.
78. **Черных, И. В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
79. **Савкова, Т. Н.** Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля [Текст] / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 88-92.
80. Определение средней рассеиваемой мощности светодиодным модулем [Текст] / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Е. Н. Подденежный [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 273-278.
81. **Болгарский, А. В.** Термодинамика и теплопередача [Текст]: учеб. для вузов / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. – М.: Высш. шк., 1975. – 495 с.
82. **Задков, В. Н.** Компьютер в эксперименте: Архитектура и программные средства систем автоматизации [Текст]: учеб. рук. / В. Н. Задков, Ю. В. Пономарев. – М.: Наука, 1988. – 376 с.
83. Моделирование в среде Labview [Текст]: учеб. пособие (лаборатор.

- практикум) / авт.-сост.: П. А. Звада, Д. С. Тучина. – Ставрополь: СКФУ, 2019. – 130 с.
84. **Магда, Ю. С.** LabVIEW [Текст]: практ. курс для инженеров и разработчиков / Ю. С. Магда. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.
85. **Агунов, А. В.** Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах [Текст] / А. В. Агунов. – СПб.: СПбМТУ, 2009. – 134 с.
86. Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems [Text] / P. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // XVIII IMEKO world congress metrology for a sustainable development. September, 17-22, 2006. – Rio de Janeiro, Brazil. – 2006. – Vol. 3. – P. 1802-1807.
87. **Зыкин, Ф. А.** Измерение и учет электрической энергии [Текст] / Ф. А. Зыкин, В. С. Каханович. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 104 с.
88. **Чижма, С. Н.** Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С. Н. Чижма. – Омск, 2014. – 329 с.
89. **Крогерис, А. Ф.** Мощность переменного тока [Текст] / А. Ф. Крогерис. – Рига: Латв. АН, 1993. – 149 с.
90. **Маевский, О. А.** Энергетические показатели вентильных преобразователей [Текст] / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
91. **Жежеленко, И. В.** О методах расчета реактивной мощности при несинусоидальных режимах [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Промышл. энергетика. – 1985. – № 12. – С. 34-37.
92. **Кадомский, Д. Е.** Активная и реактивная мощности – характеристики средних значений работы и энергии периодического электромагнитного поля в элементах нелинейных цепей [Текст] / Д. Е. Кадомский // Электричество. – 1987. – № 7. – С. 39-43.
93. Скин эффект [Текст]: лаборатор. работа № 316 / В. М. Буханов, Т. М.

- Глушкова, А. В. Матюнин [и др.]. – М.: МГУ, 2011. – 12 с.
94. **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле [Текст]: учеб. для электротехн., энергет., приборостроит. спец. вузов / Л. А. Бессонов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.: ил.
95. **Аничков, С. П.** Интергармоники в электрической сети предприятий черной металлургии [Текст] / С. П. Аничков // Актуальные вопросы современной техники и технологии: сб. докл. III Междунар. науч. заоч. конф. Липецк, 29 янв. 2011 г.: в 2 ч. – Липецк, 2011. – Ч. 2. – С. 7-10.
96. **Жежеленко, И. В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.: ил.
97. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.: ил.
98. **Czarnecki, L. S.** Powers in nonsinusoidal networks: their interpretation, analysis and measurement [Text] / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Instr. Meas. – 1990. – Vol. IM-39, № 2. – P. 340-344.
99. IH0101 IEEE: Interharmonics Task Force Working Document. 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sagroups.ieee.org/harmonicswg/wpcontent/uploads/sites/445/2022/01/i_h519b.pdf. – Загл. с экрана.
100. Estimating the interharmonic content in the power supply system [Text] / J. Ruiz, E. Aramendi, L. Leturiondo, A. Lazkano // Proc. of Mediterranean 9th Electrotechnical Conference. – 1998. – Vol. 2. – P. 1013-1017.
101. **Loskarn, M.** Interharmoniczne w systemie elektroenergetycznym [Text] / M. Loskarn, I. V. Žeželenko, Z. Hanzelka // VI szkola-konferencja Elektrotechnika Prady Niesinusoidalne. – Zielona Góra (Polska), 2002. – P. 117-142.
102. **Kuśmierk, Z.** Interharmonic and harmonic of current in power supply

- network [Text] / Z. Kuśmierk, M. J. Korczynski // Proc. 5th Int. Conf. on Electrical Power Quality and Utilization. – Cracow (Poland), 1999.
103. IEC 61000-2-2: Electromagnetic Compatibility. Part 2-2: Environment. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems. 2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/63116>. – Загл. с экрана.
104. Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи [Текст] / А. Я. Бигун, О. А. Сидоров, Д. С. Осипов [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5, № 1. – С. 8-17.
105. **Арфан, А. Х.** Компьютерное управление экспериментом в системах электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А. Х. Арфан, К. А. Сатаркулов // Наука и новые технологии. – 2006. – № 1. – С. 50-54.
106. **Веселов А.Е.** Анализ технических потерь активной электроэнергии во внешних сетях промышленных предприятий [Текст] / А.Е. Веселов, Г.П. Фастий, Е.А. Токарева // Вестник Московского государственного технического университета. - 2009. – Т. 12, №1. – С. 78-82.
107. **Железко, Ю.С.** Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю.С. Железко.- М.: Энергоатомиздат, 1985. -176 с.
108. **Железко, Ю.С.** Стоимость реактивной мощности и энергии [Текст] / Ю.С. Железко // Электрические станции.- 1989. - № 9. – С.23-26.
109. **Железко, Ю.С.** Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. - М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. -280 с.
110. **Крюков, А.В.** Моделирование систем электроснабжения [Текст] / А.В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС, 2014. - Ч. I. 142 с.
111. Компьютерный метод оценки динамического теплового режима проводника распределительных сетей [Текст] / Ч.М. Бузурманкулова,

- А.Б. Калмурзае, Ж.К. Абдыбаева, Ж.А. Сулайманова // Проблемы автоматизации и управления. -2024. -№ 1 (49). - С. 122-129.
112. **Суранов, А.Я.** LabVIEW 8.20: Справочник по функциям [Текст] / А.Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
113. Физические измерения в системе LabVIEW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/vtek/VTEK-Zadacha_35.pdf - Загл. с экрана.
114. **Гультияев, А.К.** MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows [Текст] : Практическое пособие / А.К. Гультияев. – СПб.: КОРНА принт, 1999. – 288 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Патенты

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Сертификаты