

**ОШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И
ЭКОНОМИКИ ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

Диссертационный совет Д 05.17.541

На правах рукописи
УДК: 004.94:621.3017:621.315.1(043.3)

Айдарова Айгерим Рашидовна

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И АНАЛИЗ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и
Электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек 2017

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетики» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Сатаркулов Калмурза Асанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Кадыров Ишенбек Шакирович

кандидат технических наук, доцент
Дикамбаев Шамиль Бектурганович

Ведущая организация: **ОАО «Электрические станции», 720070,
г. Бишкек, пр. Жибек-Жолу, 326.**

Защита состоится «28» апреля 2017г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 05.17.541 при Ошском государственном университете и Научно-исследовательском институте энергетики и экономики при ГКПЭиН КР по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Ахунбаева, 119.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Ошского государственного университета, 723500, г. Ош, ул. Ленина, 331, и Научно-исследовательского института энергетики и экономики при ГКПЭиН КР, 720055, г. Бишкек, ул. Ахунбаева, 119.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.

Р.А. Акпаралиев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования обуславливается тем, что развитие ключевых отраслей экономики невозможно без опережающего роста производства электрической энергии. Однако, в процессе передачи электрической энергии по электрическим сетям неизбежны потери, которые на электростанциях приводят к дополнительному расходованию энергоресурсов. *В основе методов определения потерь электроэнергии лежит учет величин тока нагрузки и сопротивления элемента сети, по которому протекает ток. При этом, как правило, предполагается, что качество электрической энергии удовлетворяет определенным требованиям стандарта и находится в установленных границах, что не всегда имеет место:* во – первых, наличие в ЭС нагрузок с нелинейными вольтамперными характеристиками приводит к изменению гармонических составляющих напряжения электропитания и является причиной возникновения интергармоник (ИГ); во – вторых из-за возможного детерминированного хаоса в режимах работы электрических сетей, содержащих нелинейные нагрузки. Вышеперечисленные факторы приводят к дополнительным потерям электроэнергии в элементах сети.

В настоящее время определение требований к интергармоникам (нормирование) находится на стадии разработки. В ряде стран стандарты по нормированию не являются обязательными или носят лишь рекомендательный характер, так как теория ИГ является относительно новой и, как следствие, малоизученной по сравнению с теорией высших гармоник. В связи с этим изучение влияния ИГ и детерминированного хаоса на величину потерь электроэнергии, с использованием технологии компьютерного моделирования, является **актуальным**, так как *осуществление натуральных испытаний, ввиду сложности их организации и необходимости вмешательства в технологический процесс предприятия, практически невозможно.* Поэтому исследуемый объект заменяют компьютерной моделью и исследуют ее поведение при различных внешних воздействиях. Часто модель значительно дешевле и доступнее натурального эксперимента: исследование на её основе требует меньшего времени и дает более подробную информацию о величинах, интересующих исследователя.

Актуальным на действующих ВЛ является и измерение потерь на корону (ПК), которое относится к трудной задаче электроэнергетики, требующей правильного методического подхода и наличия соответствующих инструментальных средств.

Значительный вклад в решение рассматриваемых проблем внесли *Российские ученые:* Г.Я. Вагин, В.Э. Воротницкий, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, В.С. Иванов, В.Н. Казанцев, Е.И. Кордюков, В.Г. Кузнецов, В.Г. Курбатский, Л.А. Кучумов, В.Г. Пекелис, Г.Е. Поспелов, Ю.Л. Саенко, С.С. Смирнов, В.И. Соколов, Н.М. Сыч, В.В. Черепанов, А.К. Шидловский, М.И.

Фурсанов, В.А. Костюшко и ученые *Кыргызской республики*: Ш.Б. Дикамбаев, В.А. Мезгин, Ю.П. Симаков. Различные методы и математические модели, используемые в настоящее время при расчете потерь электроэнергии в электрических сетях, разработаны на базе исследований выше перечисленных ведущих ученых РФ. Однако, практика эксплуатации современных электрических сетей и последние открытия хаотического режима (ХР) работы нелинейной электроэнергетической системы показывают, что необходимы дальнейшие исследования в направлении создания новых инструментов исследования и измерения потерь электроэнергии, с учетом выше отмеченных явлений (ХР, ИГ).

Связь темы диссертации с основными научно-исследовательскими работами. Актуальность проблемы подтверждается также тем, что работа по заказу МОиН КР выполнялась в НИИ Энергетики и связи при КГТУ им. И. Раззакова в рамках научного проекта: «Исследование и разработка методических и технических средств повышения эффективности работы сетей энергосистемы» на тему «Интеллектуализация датчика и разработка виртуальных инструментов для исследования ЭМО объектов электроэнергетики и ЭМС устройств в электрических сетях».

Цель и задачи исследования. Цель заключается в оценке и анализе добавочных потерь в воздушных линиях электропередачи на основе технологии компьютерного моделирования происходящих в них процессов, а также уточнения факторов, влияющих на потери от короны в воздушных линиях электропередачи в условиях высокогорья.

Основные задачи, решаемые в диссертационной работе:

– разработка метода оценки влияния хаотической составляющей напряжения на потери электроэнергии в ЛЭП при искаженной синусоидальности тока;

– разработка многофункционального виртуального прибора на основе LabVIEW, предназначенного для исследования влияния различных факторов на потери мощности и электроэнергии в воздушных ЛЭП;

– исследование на основе численного эксперимента степени влияния стохастических процессов на потери электроэнергии в элементах электрической сети ВЛ на основе их физических моделях;

– разработка экспериментальной установки с элементами автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) и нового способа измерения потерь электроэнергии на физических моделях элементов, электрической сети предназначенных для проведения измерений исследовательского характера;

– анализ физических процессов при коронном разряде высоковольтных воздушных ЛЭП, с целью уточнения влияющих факторов на потери от короны в условиях высокогорья.

Методы и средства исследований. Поставленные в работе задачи решались на основе теории электрических цепей, математического моделирования, теории электромагнитного поля, а также

экспериментальными исследованиями на физической модели. Численные эксперименты проводились на основе компьютерного моделирования в среде LabVIEW и Matlab.

Достоверность полученных результатов исследований обеспечена корректным применением математического аппарата, моделирующих программных комплексов, обоснованностью принятых допущений и подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчетов и экспериментальных данных.

Научная новизна полученных результатов:

– на основе метода переменных состояния разработана компьютерная модель воздушной линии с учетом локальной неоднородности. Предложена математическая модель двух пространственно протяженных гальванически несвязанных токопроводящих элементов электросетей для исследования влияния локальных неоднородностей параметров линий на их электромагнитные взаимодействия;

– разработан многофункциональный виртуальный прибор на основе LabVIEW, предназначенный для исследования влияния различных факторов на потери мощности и электроэнергии в воздушных ЛЭП;

– разработаны экспериментальная установка с элементами АСНИ и способ измерения потерь электроэнергии на физических моделях элементов электрической сети, предназначенные для проведения измерения исследовательского характера;

– уточнены факторы, учитываемые при оценке потерь на корону в высоковольтных воздушных ЛЭП в условиях высокогорья;

– предложен способ измерения напряжения, значение которого больше значения напряжения зажигания короны.

Основные положения, выносимые на защиту:

– компьютерная модель воздушной линии с учетом локальной неоднородности;

– математическая модель двух пространственно протяженных гальванически несвязанных токопроводящих элементов электросетей с учетом их локальной неоднородности;

– многофункциональный виртуальный прибор на основе LabVIEW, предназначенный для исследования влияния различных факторов на потери мощности и электроэнергии в воздушных ЛЭП;

– результаты анализа влияния различных факторов на потери в воздушной линии электропередачи на основе компьютерного моделирования режимов с использованием LabVIEW;

– экспериментальная установка с элементами АСНИ и способ измерения потерь электроэнергии в физической модели элемента электрической сети;

– способ измерения величины напряжения с момента зажигания короны в высоковольтных линиях;

– уточнённые факторы, которые необходимо учитывать для более

точной оценки потерь на корону в высоковольтных ЛЭП, в условиях высокогорья.

Практическое значение диссертации. Виртуальный прибор, разработанная экспериментальная установка с элементами АСНИ, способ измерения потерь электроэнергии в физической модели элемента электрической сети позволяют достоверно исследовать влияние дополнительных, ранее трудно учитываемых факторов на потери мощности и энергии в воздушных линиях электропередачи, которые должны использоваться при оценке потерь в электрических системах, содержащих мощные нелинейные нагрузки; обоснование необходимости учета дополнительных факторов, влияющих на потери от короны в высоковольтных воздушных линиях в условиях высокогорья.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы используются при проведении научно-исследовательских и лабораторных работ магистрами по направлению электроэнергетика в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова (КГТУ); разработанные методы моделирования режимов воздушных линий электропередачи используются в дипломном и курсовом проектировании на кафедре “Электроснабжение промышленных предприятий” КГТУ.

Личный вклад соискателя. Все научно-технические результаты диссертационной работы в основном получены лично автором под руководством научного руководителя.

Остальные соавторы работ принимали определенное участие в разработке нового способа измерения потерь в элементах электрической сети с использованием их физических моделей и управляющей компьютерной программы.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях:

- «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы» (Бишкек, 2014);
- «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития» (Бишкек, 2014);
- «Проблемы управления и информационных технологий» (два доклада) (Бишкек, 2015);
- «Молодежь в инновационных исследованиях» (Бишкек, 2015).

Публикации. Основные научные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 15 печатных работах, имеется 1 патент на изобретение и 1 свидетельство на управляющую программу для автоматизации эксперимента (от Кыргызпатент).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Содержательная часть работы изложена на 199 страницах компьютерного текста, имеются: 5 таблиц, 78 рисунков, копия одного патента КР на изобретение, копия одного свидетельства на управляющую программу для

автоматизации эксперимента (от Кыргызпатент), копии двух актов о внедрении, список литературы содержит 123 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные направления исследований, приводятся структура диссертации и краткое содержание работы.

В первой главе даны результаты обзора научной литературы по проблемам потерь электроэнергии, согласно которым:

1. Отклонение показателей качества электрической энергии от нормированных значений практически всегда приводит к дополнительным потерям электроэнергии в элементах сети, в том числе в воздушной линии электропередачи;

2. Определение диапазона изменения потерь электрической энергии в элементах сети существующими методами невозможно, т.к. они базируются на принципе детерминизма и для современного уровня развития науки чрезмерно упрощены, хотя некогда были наиболее приемлемыми;

3. С увеличением ЭП с нелинейной характеристикой возрастает вероятность возникновения детерминированных хаотических высокочастотных колебаний тока и напряжения в электрических сетях. В результате появляются стохастические составляющие тока и напряжения;

4. На сегодняшний день, в условиях роста различных мощных нелинейных нагрузок, анализ качества электроэнергии без учета влияния **интергармоник (ИГ)** на уровни электромагнитной совместимости (ЭМС) в промышленных электрических сетях является неполным;

5. Дополнительных исследований требует и определение потерь на корону, так как, согласно результатам исследований, проведенных в работах ведущих специалистов, общепринятая методика дает заниженные значения как удельных потерь мощности на корону, так и годовых потерь электроэнергии на корону.

Во второй главе на основе метода переменных состояния составлены:

- 1) математическая модель (ММ) участка ВЛ;
- 2) ММ двух пространственно протяженных гальванически несвязанных токопроводящих элементов электросетей. Первая ММ позволяет анализировать физические процессы, происходящие в линии при передаче по ней электрической энергии с учетом возможных локальных неоднородностей линии, а вторая – моделировать взаимные электромагнитные влияния двух пространственно протяженных гальванически несвязанных токопроводящих элементов электросетей также с учетом возможных локальных неоднородностей.

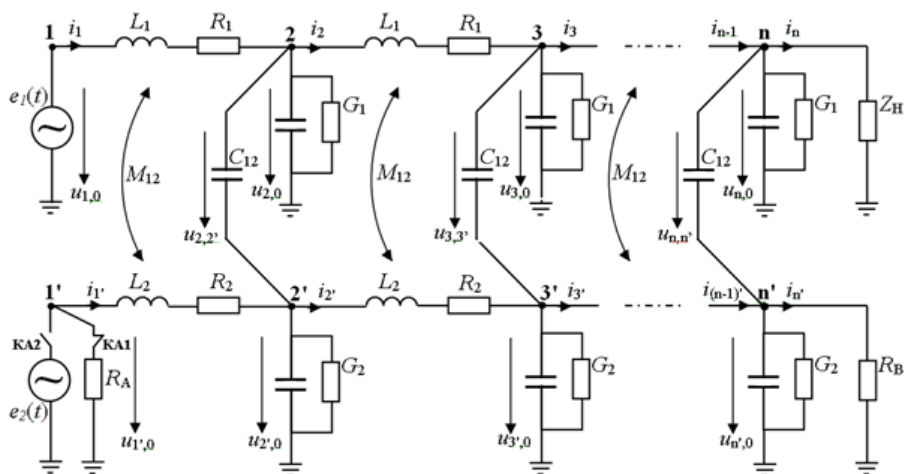


Рис.1. Схема замещения исследуемой сети, где $Z_H = R_H + j\omega L_H$

На рис.1 коммутационные аппараты KA_1 и KA_2 изображены только для того, чтобы иметь возможность анализа электромагнитных взаимодействий смежных протяженных элементов электрической сети. Первый вариант: верхний элемент активен, а нижний пассивен (KA_1 – замкнут, KA_2 – разомкнут); второй: оба элемента активны (KA_1 – разомкнут, KA_2 – замкнут). В качестве переменных состояния выбраны напряжения $u_{2,0}, u_{3,0}, \dots, u_{n,0}, u_{2',0}, u_{3',0}, \dots, u_{n',0}$ и токи $i_1, i_2, \dots, i_n, i_1', i_2', \dots, i_{n'}$ вдоль 1-ой и 2-ой линий.

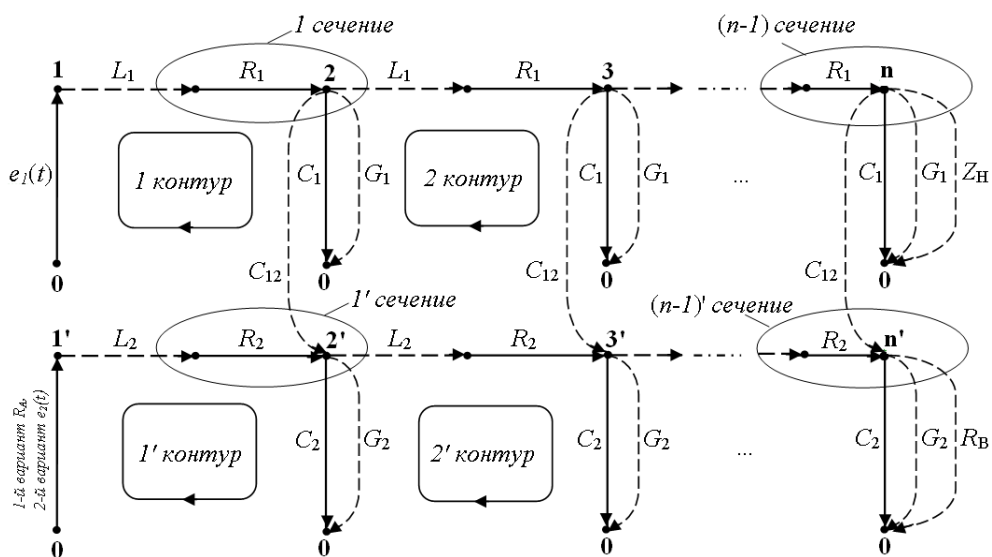


Рис.2. Нормальный граф исследуемой сети

Составлены уравнения для независимых сечений и независимых контуров по первому и соответственно второму законам Кирхгофа для 1-го варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа (рис. 2) содержит R_A , т.е. коммутационный аппарат KA_1 замкнут, а KA_2 – разомкнут; и второго варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа (рис.2) содержит $e_2(t)$, т.е. коммутационный аппарат KA_1 разомкнут, а KA_2 – замкнут.

Далее, полученные уравнения записаны в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{dX}{dt} = \begin{bmatrix} G & F_{12} \\ F_{21} & R \end{bmatrix} \cdot X + S \cdot E, \quad (1)$$

где

$$X = \begin{bmatrix} u_{2,0} & u_{3,0} & \dots & u_{n,0} & u_{2',0} & u_{3',0} & \dots & u_{n'} & i_1 & i_2 & \dots & i_{n-1} & i_n & i_{1'} & i_{2'} & \dots & i_{(n-1)'} \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 + C_{12} & 0 & \dots & 0 & -C_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_1 + C_{12} & \dots & 0 & 0 & -C_{12} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_1 + C_{12} & 0 & 0 & \dots & -C_{12} \\ -C_{12} & 0 & \dots & 0 & C_2 + C_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -C_{12} & \dots & 0 & 0 & C_2 + C_{12} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -C_{12} & 0 & 0 & \dots & C_2 + C_{12} \end{bmatrix},$$

$$G = \text{diag} \left[\begin{matrix} G_1 & -G_1 & \dots & -G_1 & -G_2 & -G_2 & \dots & -G_2 & -G_B \end{matrix} \right], E = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix}^T;$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \pm M_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \pm M_{12} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & L_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \pm M_{12} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & L_H & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \pm M_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 & L_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \pm M_{12} & \dots & 0 & 0 & 0 & L_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \pm M_{12} & 0 & 0 & 0 & \dots & L_2 \end{bmatrix},$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad F_{21} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}.$$

Для 1-го варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа содержит R_A , т.е. КА1 - замкнут, а КА2 - разомкнут, подматрица R и матрица S записываются следующим образом:

$$R = \text{diag} \begin{bmatrix} R_1 & -R_1 & \dots & -R_1 & -R_H & -R_2 & -R_A & -R_2 & \dots & -R_2 \end{bmatrix};$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Для 2-го варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа содержит $e_2(t)$, т.е. КА1 - разомкнут, а КА2 - замкнут, подматрица R и матрица S записываются следующим образом

$$R = \text{diag} \begin{bmatrix} R_1 & -R_1 & \dots & -R_1 & -R_H & -R_2 & -R_2 & \dots & -R_2 \end{bmatrix};$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Результаты моделирования показаны на графиках (рис.3), при этом первая линия подключена к источнику напряжением 220 кВ, а вторая линия заземлена с обоих концов через R_A и R_B . Параметры линии и нагрузки: ($R_1=0.1818$ Ом/км; $R_2=0.1818$ Ом/км; $L_1=0.0133$ Гн/км; $L_2=0.0133$ Гн/км; $C_1=0.000000182$ Ф/км; $C_2=0.000000182$ Ф/км; $G_1=0$ См; $G_2=0$ См; $C_{12}=0.000000006$ Ф/км; $M_{12}=0.0000$ Гн/км; $R_A=10$ Ом; $R_B=10000$ Ом; $R_H=100$ Ом; $L_H=0.005$ Гн; $f=50$ Гц).

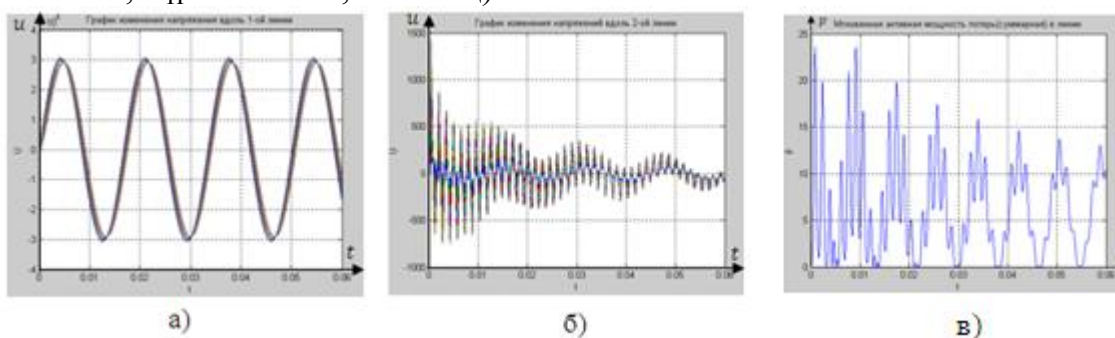


Рис.3. Временная зависимость напряжений: а) - вдоль первой линии; б) – вдоль второй линии; в) - временная зависимость активной мощности потерь от наведенных токов во второй линии

Результаты моделирования показывают, что во втором проводе, начало и конец которого соединены с землей соответственно сопротивлениями $R_A=10$ Ом и $R_B=10000$ Ом, за счет наведенного электрического тока, под действием наведенного напряжения (рис.3,б), наблюдаются потери активной мощности, график зависимости которой от времени показан на рис.3, в.

В третьей главе на основе метода компьютерного моделирования предложен способ оценки влияния хаотической составляющей напряжения на потери электроэнергии в проводе ВЛ при искаженной синусоидальности тока в нем. Разработан виртуальный прибор (ВП) на основе LabVIEW, предназначенный для исследования спектрального состава напряжения

(ССН) воздушных линии и влияния ССН при хаотическом режиме работы электрической сети на дополнительные потери при передаче энергии переменным током от источника напряжением $u = u_s + u_c$ через сопротивление Z_L обоих проводов линии к переменному сопротивлению Z_H нагрузки, где $u_s = U_m \sin(\omega t + \psi)$, u_c – стохастическая составляющая приложенного напряжения. При изложении материала ток и напряжение названы сигналом.

Комплексные сопротивления провода линии и нагрузки обозначены

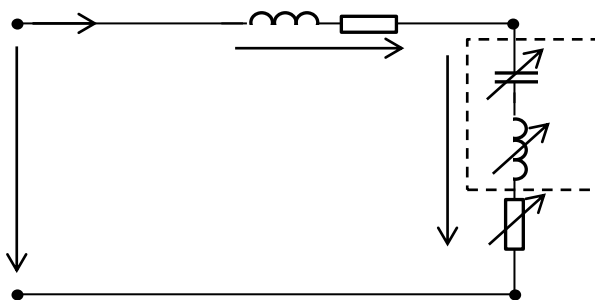


Рис.4. Передача энергии в электрической сети от источника напряжения к нагрузке

через $Z_L = r_L + jx_L$ и $Z_H = r_H + jx_H$ соответственно (рис.4).

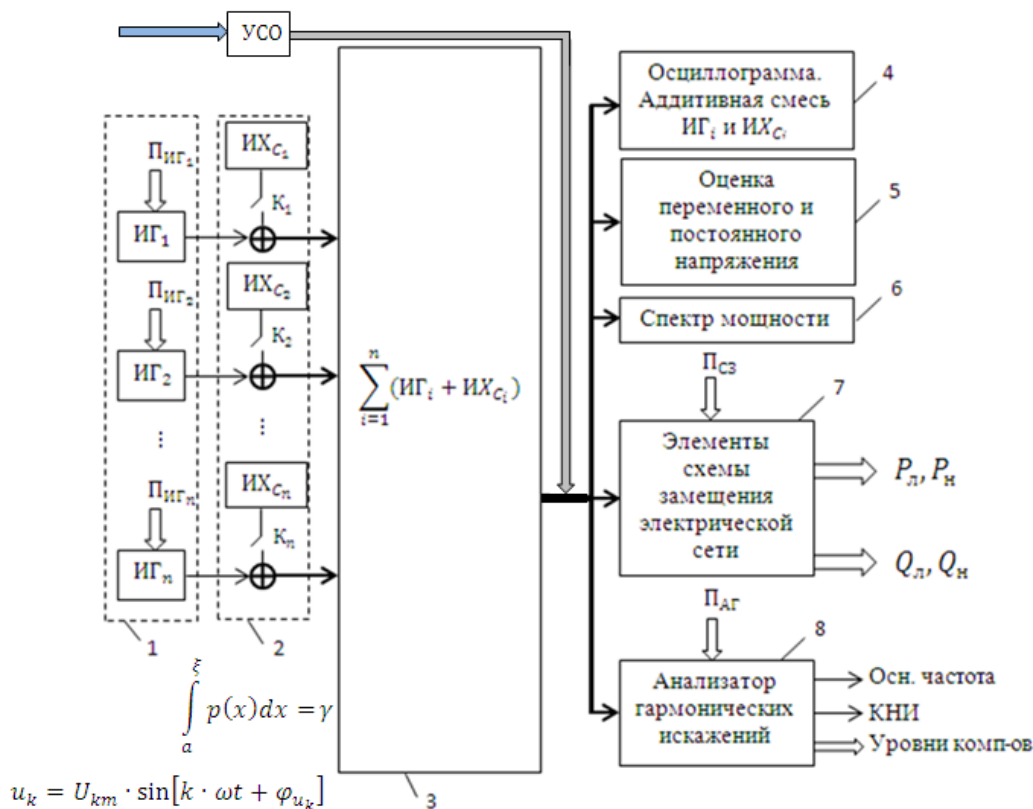


Рис.5. Структура и компоненты ВП

Изложен порядок разработки многофункционального виртуального прибора (ВП) на основе LabVIEW.

Отмечено, что функциональность ВП определяется его структурой и возможностью его компонентов. Структура и компоненты ВП изображены на рис. 5. На рисунках 6 и 7 соответственно приведены лицевая панель и блок-диаграмма разработанного ВП. Используя рисунки 5, 6 и 7, пояснены работа и назначение функциональных элементов ВП. В блоке 1 (рис.5) осуществляется модельная генерация гармоник или интергармоник сигналов. На рис.7 под этим же номером показан один из таких элементов, который осуществляет генерацию гармоник/интергармоник.

Мгновенное значение сигнала:

$$u_k = U_{km} \cdot \sin k \cdot \omega t + \varphi_{u_k} , \quad (2)$$

где k – номер гармоники; u_k – мгновенное значение k – ой гармоники сигнала; U_{km} – значение амплитуды соответствующей гармоники сигнала с частотой $k \cdot \omega t$ для момента времени t ; φ_{u_k} – значение начальной фазы k – ой гармоники сигнала для момента времени t ; ω – круговая частота источника электроэнергии.

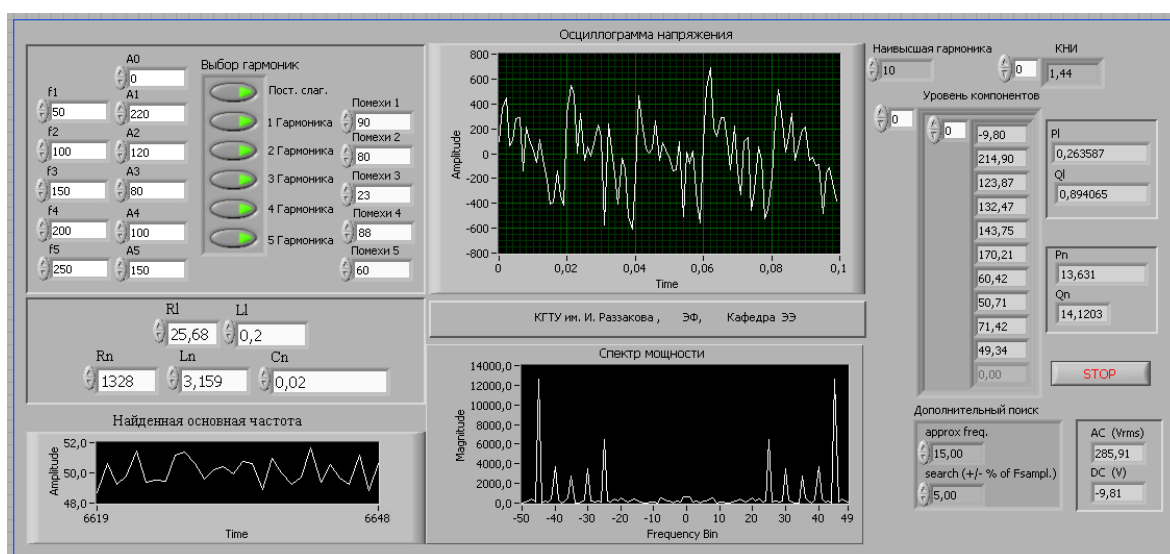


Рис.6. Передняя панель ВП

В блоке 2 (рис.5) имитируются хаотические составляющие соответствующих гармоник сигнала с заданным законом распределения случайного процесса. Закон распределения соответствующих хаотических составляющих гармоник сигнала выбирается из следующего списка: *гауссовский белый шум; периодический белый шум; равномерный белый шум.*

Значения соответствующих хаотических составляющих, сгенерированных в блоке 2, поступают в блок 3, если соответствующие ключи K_i (рис.5) замкнуты.

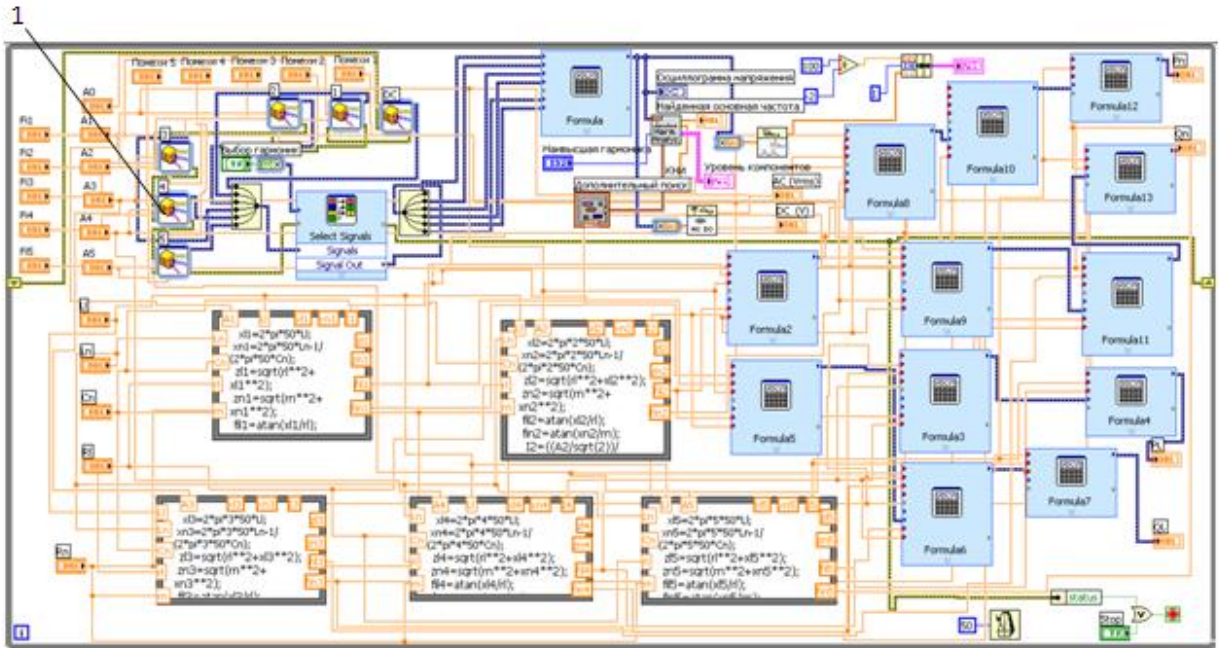


Рис.7. Блок-диаграмма ВП для исследования влияния спектрального состава напряжения воздушной линии и хаотического режима работы электрической сети на потери; 1– генератор гармоник или интергармоник

Основной сигнал $ИГ_i$ и хаотическая составляющая $ИХ_{C_i}$ при одновременном воздействии накладываются друг на друга, образуя аддитивную смесь основного и хаотического сигналов. В этом случае суммарное воздействие сигнала (напряжения) на элементы электрической сети равно

$$u = \sum_{i=1}^n ИГ_i + ИХ_{C_i} = \sum_{i=1}^n u_{s_i} + u_{c_i} = u_s + u_c. \quad (3)$$

Количество гармонических составляющих напряжения (сигнала) u можно регулировать, замыкая/размыкая ключи K_i (рис.5).

Содержимым блока 7 (рис.5) являются математические модели элементов исследуемой электрической сети (рис.4).

Так как на вход блока 7 (рис.5), содержимым которого являются математические модели элементов электрической сети (рис.4), воздействует напряжение $u = u_s + u_c$ с выхода блока 3, то по элементам сети протекает электрический ток, состоящий из смеси гармоник /интергармоник, а также их хаотических составляющих, в зависимости от положения ключей K_i ($i = 1 \dots n$). Вследствие этого, в активных элементах ВЛ и нагрузки наблюдается потеря электроэнергии от всех составляющих электрического тока. В виртуальном приборе его элементами, в которых производятся вычисления отдельно для каждой гармоники/интергармоники, являются формульные узлы (ФУ) (рис.7).

Суммарные потери от всех гармонических и хаотических составляющих тока в ВЛ и потребляемые мощности, как активные, так реактивные, в нагрузке определяются в Экспресс–ВП «Формула».

Для исследования влияния гармонических и интергармонических составляющих электрического тока, протекающего по ВЛ, на потери электроэнергии в ней необходимо проанализировать гармонический состав тока, так как наличие хаотической составляющей тока приводит к постоянному изменению состава гармоник. Это утверждение в дальнейшем обосновано результатами численного эксперимента.

Для анализа спектров могут применяться методы спектрального анализа, например, математический аппарат рядов Фурье.

Полный гармонический анализ, включая измерение основной частоты и ее гармоник, осуществляется в блоке 8 (рис.5). Это операция в ВП реализуется с помощью функции «Анализатор гармонических искажений».

На вход функции «Анализатор гармонических искажений» подаются значения двух параметров: «Наивысшая гармоника»; «Входной сигнал». В результате анализа возвращаются: «Найденная основная частота»; «Уровень компонентов»; «Коэффициент нелинейных искажений» (КНИ).

КНИ определяется как отношение среднеквадратичного значения суммы гармоник к амплитуде основного тока.

Спектр мощности входного сигнала (3) вычисляется в ВП с помощью функций спектрального анализа:

$$S_{xx} = \frac{1}{n^2} X^* f \cdot X f = \frac{1}{n^2} X f^2 = \frac{1}{n^2} F x t^2, \quad (4)$$

где n – длина входной последовательности (сигнала); $X^* f$ – комплексно-сопряженный спектр сигнала.

Распределение мощности по гармоникам:

S_{xx0} – мощность постоянной составляющей;

$S_{xx1} = S_{xx(n-1)}$ – мощность 1-й гармоники (основная частота);

...

$S_{xx k-1} = S_{xx n- k-2}$ – мощность $k - 1$ – гармоники.

Для оценки потери в исследуемом элементе электрической сети от всех гармонических составляющих тока, протекающего по этому элементу, включая постоянную и хаотическую составляющие, можно воспользоваться функцией, выполняющей соответствующую операцию с сигналами (блок 5 рис.6).

В виртуальном приборе такая операция реализована функцией AC&DC (оценка переменной и постоянной составляющих сигнала) (рис.7).

В блоке 4 (рис.5) выводится осциллограмма сигнала, представляющего собой аддитивную смесь сигналов (3).

На передней панели ВП (рис.6) на экран виртуального осциллографа 5 выводятся осциллограммы функциональной зависимости $u(t)$.

Далее предлагается порядок работы с ВП, выводятся результаты его тестирования и анализа значений численного эксперимента.

Испытание работоспособности разработанного ВП на основе LabVIEW показало, что несомненным его достоинством является возможность учитывать необходимое количество факторов, обеспечивающих полный контроль влияния всех входных параметров на результат моделирования, что не всегда возможно в реальном эксперименте. И, кроме того, использование ВП позволило обнаружить «странное» изменение ССЧ при появлении интергармонических составляющих.

В четвертой главе диссертации, основываясь на существующих публикациях, отмечается, что во всех математических моделях, которые используются для определения потерь электроэнергии, учитываются величина тока нагрузки и сопротивление элемента сети, по которому этот ток протекает, при этом, как правило, принимается, что показатели качества электрической энергии находятся в установленных стандартом границах. Однако, последнее предположение не всегда является справедливым. Во – первых, из-за появления в таких сетях высших гармоник, в том числе и интергармоник, во – вторых, из-за детерминированного хаоса в режимах работы электрических сетей, содержащих нелинейные нагрузки.

В научных публикациях существует мнение, что протекание гармонических процессов в сложных электрических сетях на сегодняшний день не изучено.

В диссертации подчеркивается: и в простых электрических сетях этот процесс недостаточно изучен, особенно, когда на гармонические процессы накладываются хаотические и, кроме того, ещё присутствуют интергармонические составляющие. Поэтому, для исследования влияния выше отмеченных явлений на величину дополнительных потерь в элементах электрической сети необходимы точные способы измерения технических потерь. В принципе технические потери можно измерить с помощью приборов, фиксирующих поступление и отпуск электроэнергии на рассматриваемом элементе сети. Учет электроэнергии осуществляется с использованием измерительных трансформаторов тока (ТТ), трансформаторов напряжения (ТН) и собственно приборов учета. Однако, использование существующих приборов учета для точного измерения поступающей и отпускаемой электроэнергии не вполне корректно, так как измерительные приборы калибруются при чисто синусоидальной токе и напряжении, поэтому при их использовании для измерения мощности при искаженных токах и напряжениях они могут давать погрешности сверх нормированных.

Микропроцессорные системы, которые относятся к более точным системам учета электроэнергии, имеют свои недостатки. Эти недостатки

связаны с проблемой дискретизации входного сигнала, т.е. с преобразованием аналоговой формы сигнала в цифровой. Трудности возникают, когда входной сигнал представляет собой нестационарные случайные процессы: в этом случае возможны ошибки маскировки частот.

Цель данного раздела диссертации заключается в разработке на физической модели элемента электрической сети калориметрического способа измерения потерь, который используется только при проведении научных исследований.

Так как в этом способе не используются электромеханические или микропроцессорные системы учета электроэнергии, то на точность измерения потерь не влияет качество электрической энергии.

Предложен калориметрический метод измерения энергии тепловых потерь в элементах электрической сети с использованием их модели и соответствующих устройств для управления режимом электросети.

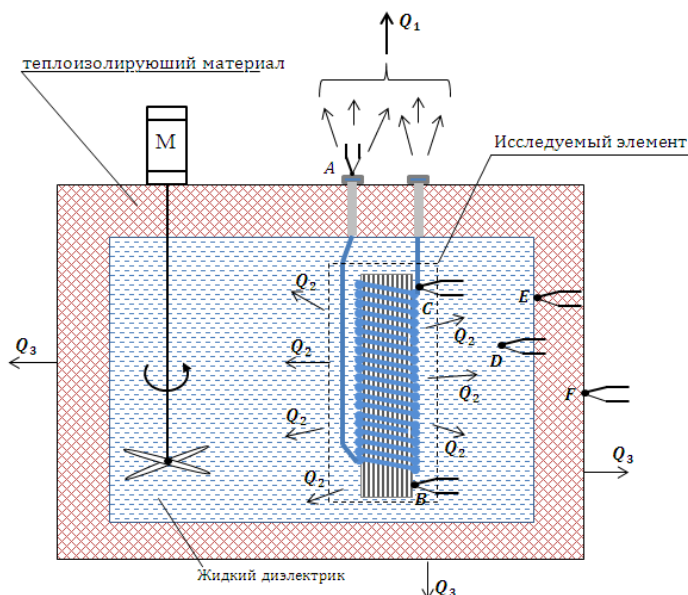


Рис.8. Калориметр для измерения энергии тепловых потерь, выделяющейся при работе физической модели элемента электрической сети

Основным элементом калориметрической системы (рис.8) является физическая модель исследуемого элемента (ИЭ) электрической сети в виде отдельного блока, помещенного в теплоизолированный корпус из плотного теплоизолирующего материала (ТИМ).

Пространство между ТИМ и блоком заполняется диэлектрической жидкостью. Измерение температуры проводится термопарами, установленными в различных точках калориметра, в том числе на стенках элементов физической модели, а на поверхности калориметра и на некотором расстоянии от него также на крепежных элементах. Значения напряжения с термопар поступают на АЦП и через устройства согласования на цифровые индикаторы.

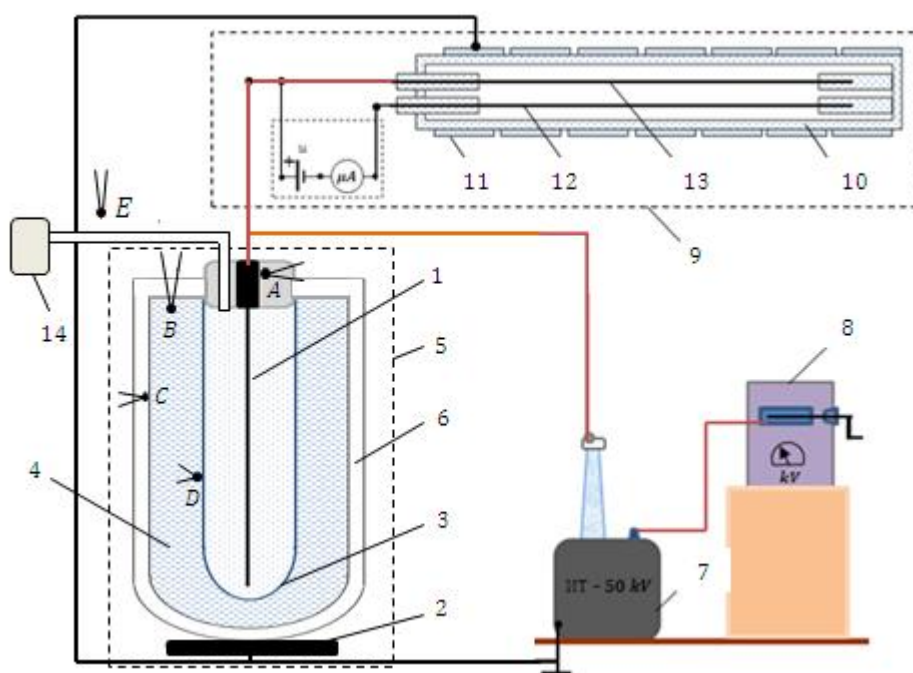


Рис.9. Калориметр для измерения потери от коронирующего провода 1

Для испытания работоспособности предлагаемого в диссертации калориметрического способа измерения потерь электроэнергии на физической модели элемента электрической сети (рис.8), изготовлен действующий макет лабораторной установки, предназначенный для измерения потерь от коронирующего провода, представляющего физическую модель провода ВЛ (рис.9).

Описание экспериментальной установки (ЭУ) и хода эксперимента.

Для измерения потери от коронирующего провода и возможной диэлектрической потери, собрана ЭУ, представленная на рис. 9.

На рис. 9: 1 - физическая модель коронирующего провода, находящийся внутри стеклянной колбы - 3; 2 – внешний электрод; 4 – дистиллированная вода; 5 - калориметр; 6 – стеклянная колба с вакуумной термоизоляцией; 7 - испытательный трансформатор; 8 – лабораторный автотрансформатор; 9 – измеритель напряжения; 10 – стеклянная трубка заполненная аргоном; 11 – электрод в виде спирали насаженная на стеклянную трубку; 12, 13 – полированные трубчатые электроды; 14 – устройство для создания необходимого атмосферного давления в коронирующем объеме.

Основным элементом калориметрической системы является физическая модель провода – 1 в виде отдельного блока – 3, помещенного в колбу заполненная диэлектрической жидкостью (дистиллированная вода) с вакуумной термоизоляцией (рис. 9).

Измерение температуры проводится установленными в различных точках калориметра термопарами (A, B, C, D), в том числе на некотором расстоянии от него E для измерения температуры окружающей среды.

Диаметр соединительного провода, с помощью которого напряжение подается на испытываемый элемент 1, подобран таким образом, чтобы напряженность электрического поля на поверхности соединительного провода в процессе эксперимента была бы меньше напряженности начала зажигания короны.

Диаметр провода 1 подобран таким, чтобы при напряжении провода более 1 кВ на его поверхности зажглась устойчивая корона.

Предложен способ измерения напряжения провода 1 с момента зажигания коронного разряда на поверхности электрода 13 (рис.9). Способ основан на использовании функциональной зависимости величины тока I , протекающего между электродами 12,13, и от величины напряжения U провода 1:

$$I = f U . \quad 5 .$$

Измерив микроамперметром μA (рис.9) значения тока I , из выражения (5) определяем U провода.

Для установления зависимости (5) использована схема, показанная на рис.10.

Отмечено, что коронный разряд на электроде, а следовательно, и ток короны I зависят от напряжения провода U и от множества различных факторов, таких как x_1 – «состояние поверхности электрода», x_2 – «геометрия поля», x_3 – «природа газа», x_4 – «плотность газа», x_5 – «влажность газа»: $I = f(U, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$.



Рис.10. Схема для установления зависимости значения измеренного микроамперметром μA постоянного тока короны от величины переменного напряжения u_3 , приложенного между электродами 2 и 1 с момента возникновения коронного разряда на электроде 2 ; T_1 – лабораторный автотрансформатор; T_2 – испытательный трансформатор; R_3 – защитное сопротивление; 1 – упругая пружина в виде металлической ленты из нержавеющей стали; 3 – стеклянная трубка с электродами 2, заполненная газом

Для определения однозначной зависимости I , от U необходимо исключить влияние факторов – x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , кроме напряжения электрода. Для этого электроды 12 и 13 (рис.9), после тщательной очистки и полировки, помещены в стеклянную трубку 10, заполненную газом (аргон) давлением в одну атмосферу. Трубка запаяна, чтобы полностью исключить связь с внешней атмосферой.

В заключении, уточнены факторы, влияющие на потери от короны в высоковольтных воздушных линиях электропередачи.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований автором решены следующие научные и практические задачи:

1. Для проведения качественного и количественного анализа влияний малоизученных факторов на значения потерь электроэнергии в воздушной линии электропередачи автором создан и впервые представлен виртуальный прибор (ВП), разработанный в среде LabVIEW, позволяющий наглядно и обозримо провести анализ спектрального состава напряжения и тока в воздушной линии при хаотическом режиме работы электрической сети и определить дополнительные потери при возникновении высших и интергармоник.

При испытании ВП получены следующие новые результаты:

– численный эксперимент показал, что при появлении хаотических составляющих по каждой рассматриваемой гармонике потери в ВЛ изменяются в широких пределах от 0 до 46% по сравнению с состоянием отсутствия хаотических составляющих;

– такое изменение дополнительных потерь в ВЛ мы объясняем возникновением в исследуемой сети дополнительных гармоник;

– доказательством возникновения дополнительных гармоник является спектральный состав, полученный при проведении эксперимента; заметим, что количество возникающих гармоник при заданных параметрах эксперимента динамично изменяется случайным образом;

– при появлении интергармоник потери в ВЛ увеличились на 1,98% по сравнению с тем, когда интергармоники отсутствовали;

– увеличение потерь можно объяснить тем, что появление интергармоник привело к увеличению значения амплитуды основной (первой) гармоники;

2. Разработан способ измерения потерь электроэнергии в элементе электрической сети с использованием его физической модели. Предложенный способ позволяет произвести измерение величины потери электроэнергии независимо от степени искаженности электрического тока и от величины его хаотических составляющих;

3. Предложен способ измерения напряжения ВЛ с момента зажигания коронного разряда. Для реализации предложенного способа изготовлен действующий макет устройства с экспериментальной установкой. Устройство представляет собой стеклянную трубку, заполненную газом (аргон) давлением в одну атмосферу, внутри трубки установлены после тщательной очистки и полировки электроды, а снаружи на стеклянную трубку насажена упругая пружина в виде металлической ленты из нержавеющей стали. Трубка запаяна, чтобы полностью исключить сообщение с внешней атмосферой. Испытание показало работоспособность устройства.

Приведены результаты модельных экспериментальных исследований.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Айдарова, А.Р.** Разработка экспериментальной установки с элементами АСНИ для исследования процессов в электрических сетях [Текст]: / Р.Б. Куржумбаева, А.Р. Айдарова // Известия Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. - Бишкек, 2013. - №1. – С. 21-25.
2. **Айдарова, А.Р.** Компьютерное моделирование при решении прикладных задач электроэнергетики [Текст]: / А.Р. Айдарова // Известия вузов. - Бишкек, 2014. - №1. – С. 31-36.
3. **Айдарова, А.Р.** Компьютерная модель для исследования влияния стохастических факторов на потери энергии в электрических сетях [Текст]: / А.Р. Айдарова // Поиск – Международный научный журнал Республики Казахстан. - Алматы, 2014. - №1. – С. 71-77.
4. **Айдарова, А.Р.** Компьютерное моделирование для изучения дополнительных причин потерь в электрических сетях [Текст]: / А.Р. Айдарова // Известия КГТУ. - Бишкек, 2014. - №32. - С. 65-71 (РИНЦ).
5. **Айдарова, А.Р.** О дополнительных причинах потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст]: / А.Р. Айдарова // Материалы международной научно-практической конференции на тему: «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы». - Бишкек, 2014. - С. 47-52.
6. **Айдарова, А.Р.** К вопросу уточнения факторов, влияющих на потери мощности в воздушных линиях электропередачи [Текст]: / А.Р. Айдарова // Известия КГТУ.- Бишкек, 2015. - №32. - С. 188-194.
7. **Айдарова, А.Р.** Исследование влияния различных факторов на величину нагрузочных потерь энергии в элементах электрической сети [Текст] : / А.Р. Айдарова, Ж.Д. Байбагысова, Г.К. Усубалиева // Проблемы автоматизации и управления: науч. – техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ, 2015. - С. 61-67
8. **Айдарова, А.Р.** Решение задач моделирования при исследовании потерь в элементах электрической сети LabVIEW [Текст]: / А.Р. Айдарова, Ж.Д. Байбагысова, А. Кадиева // Проблемы автоматизации и управления: науч. – техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ, 2015. - С. 67-71.

9. **Айдарова, А.Р.** Моделирование взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи [Текст]: / А.Р. Айдарова, Ж.С. Абылгазиев, С.М. Асанова // Научно-Издательский центр «Априори».- Россия. – Краснодар, 2015.-№5
10. **Айдарова, А.Р.** Контроль параметров режима электрической сети с использованием измерительного трансформатора нового типа [Текст]: / А.Р. Айдарова, Ж.С. Абылгазиев // Научный альманах - Россия. - Тамбов, 2015.- №9. - С. 666-670.
11. **Айдарова, А.Р.** Решение некоторых задач электроэнергетики с помощью компьютерного моделирования [Текст]: / А.Р. Айдарова, Г.Н. Ниязова, А.М. Яблочников // Проблемы автоматики и управления: науч. – техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ, 2015.- С. 75-81.
12. **Айдарова, А.Р.** Моделирование системы электроснабжения с целью исследования влияния несимметричной нагрузки на качество электроэнергии [Текст]: / А.Р. Айдарова, Г.Н. Ниязова // Проблемы автоматики и управления: науч. – техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ. - Бишкек, 2016. - С. 42-46.
13. **Айдарова, А.Р.** Исследование влияния интергармоники на сетевую составляющую частоты и потери электроэнергии в воздушной линии электропередачи [Текст]: / А.Р. Айдарова, Ж.Д. Байбагысова и др. // Известия ВУЗов Кыргызстана. - Бишкек, 2016. - С. 41-46.
14. Пат.1791. Регулируемый многофункциональный измерительный трансформатор [Текст] / А.Р. Айдарова, Т.К. Сатаркулов и др. // Гос.Служба Интеллектуальной Собственности и Инноваций при Правительстве КР (Кыргызпатент). – № 1791 от 30.09.15 г. – 7 с.
15. Свидетельство на программу для ЭВМ: Управляющая программа экспериментальной установкой с элементами АСНИ для исследования потерь в распределительных сетях [Текст]: / А.Р. Айдарова и др. // Государственная патентная служба КР. - Свидетельство на программу для ЭВМ № 265 от 20.02.13 г.

РЕЗЮМЕ

диссертации Айдаровой Айгерим Рашидовны на тему:
**«Компьютерное моделирование и анализ добавочных потерь
электроэнергии в воздушной линии электропередачи»**
на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.14.02 - электростанции и электроэнергетические системы

Ключевые слова: потери электроэнергии, потери на корону, измерение потерь электроэнергии, LabVIEW, компьютерное моделирование, стохастическая составляющая тока и напряжения, измерение напряжения появления короны.

Цель работы – оценка и анализ дополнительных потерь в воздушных линиях электропередачи на основе компьютерного моделирования. Разработка нового способа измерения потерь электроэнергии на основе физической модели элементов электрической сети, предназначенного для проведения научных экспериментов. Уточнение факторов, влияющих на потери от короны в воздушных линиях электропередачи в условиях высокогорья.

Полученные результаты: на основе метода переменных состояния разработана компьютерная модель воздушной линии с учетом локальной неоднородности. Предложена математическая модель двух пространственно протяженных гальванически несвязанных токопроводящих элементов электросетей для исследования влияния локальных неоднородностей параметров линий на их электромагнитные взаимодействия; разработан многофункциональный виртуальный прибор на основе LabVIEW, предназначенный для исследования влияния различных факторов на потери мощности и электроэнергии в воздушных ЛЭП; разработаны экспериментальная установка с элементами АСНИ и новый способ измерения потерь электроэнергии на физических моделях элементов электрической сети, предназначенные для проведения измерений исследовательского характера; уточнены факторы, которые необходимо учитывать при оценке потерь на корону в высоковольтных воздушных ЛЭП, в условиях высокогорья; предложен способ измерения напряжения, значение которого больше напряжения зажигания короны.

Разработана и запатентована конструкция регулируемого трансформатора тока.

РЕЗЮМЕСИ

Айдарова Айгерим Рашидовнанын 05.14.02 – электр станциялары жана электр энергетикалык системалар адистиги боюнча техника илимдеринин кандидаты илимий даражасы үчүн “Абачубалгылардагы кошумча жоготууларды компьютердик моделдештирүү жана анализдөө” атуу темадагы изилдөөчүлүк диссертациясынын

Негизги сөздөр: электр энергиянын жоготуулары, тажыдагы жоготуулар, электр энергиянын жоготууларын өлчөө, LabVIEW, компьютердик моделдештирүү, өзгөрүлмө абалдын ыкмасы, токтуун жана чыңалуунун стохастикалык курамы, чыңалууну өлчөө, тажынын пайда болушу.

Диссертациялык иштин максаты – электр энергиянын абачубалгыларындагы кошумча жоготууларга баа берүү жана анализдөө, алардын ичиндеги процесстерди компьютердик моделдештирүүнүн негизинде аныктоо. Электрдик тармактарынын физикалык элементтер моделинин негизинде электр энергиянын жоготууларын өлчөөчү жаңы ыкма иштеп чыгуу. Тоолуу аймак шарттарындагы электр энергия берүүчү абачубалгыларындагы тажыдагы жоготууларга таасир этүүчү факторлорду тактоо.

Алынган жыйынтыктар: абалы жөнүндө маалымат алып жүрүүчү өтмө процесстин параметрлерин аныктоо максатында электрдик процесстерди моделдештирүүгө мүмкүнчүлүк түзгөн эки чынжырлуу чубалгынын жалпыланган математикалык модели иштелип чыкты; абачубалгынын электр энергия берүү чубалгыларындагы кубаттуулуктун жана электр энергиянын жоготууларына таасир эткен ар түрдүү факторлорду изилдөөгө багытталган LabVIEW негизинде көп аракеттүү шарттуу аспап иштелип чыкты; ИИАС (АСНИ) элементтери менен эксперименталдык түзүлүш жана электр тармактарынын элементтеринде электр энергиянын жоготууларын өлчөөчү жаңы ыкма иштелип чыкты; бийик тоолуу аймактагы шартта жогорку вольттогу абачубалгынын электр энергия берүү чубалгыларынын таажысындагы жоготууларды баалоодо эске ала турган факторлор такталды; тажыны жандыруучу көбүрөөк чыңалуу маанисиндеги чыңалууну өлчөөчү ыкма сунушталды.

Жөнгө салуучу трансформатордук токтуун конструкциясы иштелип чыккан жана патенттелген.

SUMMARY

Of the dissertation by Aidarova Aigerim Rashidovna on the topic
**COMPUTER MODELLING AND ANALYSIS OF ADDITIONAL ELECTRIC
ENERGY LOSSES IN AN OVERHEAD ELECTRIC POWER LINE**

For the academic degree of Candidate of Technical Sciences,
major: 05.14.02 – Power Plants and Power Systems

Key words: electric power losses, corona losses, power losses measurement, LabVIEW, computer modelling, method of state variables, stochastic component of the current and voltage, voltage measurement of starting corona.

Thesis objective: evaluation and analysis of additional losses in overhead power lines and their diagnosis by computer modelling of the processes in them. Development of new way of measurement of power network based on physical model of elements of power network. Clarification of factors influencing losses from corona in overhead power lines under highland conditions.

Obtained results: generalized mathematical model of the double-circuit line that enables to simulate the electrical processes in them aimed at determining the parameters transition process carrying information about its condition is developed; multifunctional virtual apparatus based LabVIEW designed to investigate various factors on power losses in overhead power lines is developed, experimental apparatus with ARS elements and a new way of measuring the electricity losses in the elements of power network are developed, factors that are to be considered when assessing the corona losses in high-voltage overhead power lines under highland conditions are clarified, new way of voltage measuring values of which are more than corona starting voltage is represented.

Design of adjustable current transformer is developed and patented.

Подписано к печати 18.01.17 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офс. Печать офс. Тираж 100 экз.
Бишкек, пр.Чуй 251 «CastlePrint »