УДК 621.3.016.4:620.9

Н.А.Суюнтбекова[1], nurasuuntbekova@gmail.com
[1]*КГТУ им. И.Раззакова*
К.А.Сатаркулов[2]
[2]*Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР*

СПОСОБ ИЗУЧЕНИЯ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОТЕРИ В МИКРОСЕТИ НА ЕГО ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В данной статье разработана экспериментальная установка с элементами АСНИ для автоматизации отдельных операций эксперимента в локальных микросетях электроснабжения (например, исследование дополнительных потерь при изменении качества электроэнергии).
Предложена схема лабораторной установки с автотрансформаторным датчиком тока для исследования гармонического состава тока нагрузки с нелинейными характеристиками и калориметрический способ измерения потерь ЭЭ, который по мнению исследователей, является одним из чувствительных и точных методов экспериментальных исследований, позволяющих установить практически все причины, приводящие к потерям в исследуемых элементах.
Модифицировано устройство с калориметром, содержащее необходимые элементы для проведения измерения тепловых потерь в физической модели элемента электрической сети.

Ключевые слова: потери и качество электроэнергии; датчик тока; способ измерения потерь; калориметр; нелинейная нагрузка; гармонический состав.

Введение

Экспериментальный метод исследования является заключительным этапом при установлении адекватности разработанной теоретической (аналитической) модели исследуемого процесса, в том числе и результатов, полученных на компьютерной модели (КМ) процесса, так как КМ разрабатывается на основе математической модели (ММ).

Выше отмеченное относится и к проверке адекватности моделей, построенных для исследования влияния качества электрической энергии на потери в элементах электрической микросети различного назначения.

Многими специалистами отмечается актуальность продолжения исследований как теоретического, так и экспериментального характера для уточнения возможных причин, приводящих к возникновению дополнительных потерь (ДП) электроэнергии в элементах, современных микросетях, от которых получают питание множество нагрузок, ухудшающих качество электроэнергии [1-6]. Эти исследования необходимы для проверки выдвигаемых исследователями научных гипотез о механизмах ДП.

Постановка задачи

Предложить способ и различные устройства, обеспечивающие исследования дополнительных потерь как при совместном изменении нескольких показателей качества электроэнергии (несимметрия напряжения, искажение синусоидальности кривой тока, отклонения напряжения от номинального), так и влияние их по отдельности при стохастическом характере изменения нагрузки.

Решение задачи

Предложенный способ представляет различные схемные решения, на основе которых можно создать экспериментальную установку (ЭУ), позволяющую решить поставленную задачу. При этом ЭУ позволяет автоматизировать отдельные экспериментальные операции, так как в ее составе содержатся элементы АСНИ (автоматизированная система научных исследований). Возможный вариант ЭУ в блочном представлении показан на рисунке 1, где:

1. Распределительная коробка с необходимыми коммутационно - защитными и измерительными устройствами.

2. Лабораторные автотрансформаторы (ЛАТР - SUNTEK 5000ВА, 0-300 Вольт, 20 Ампер) (3 шт.) для поддержания трехфазного напряжения на необходимом для проведения исследования уровне.

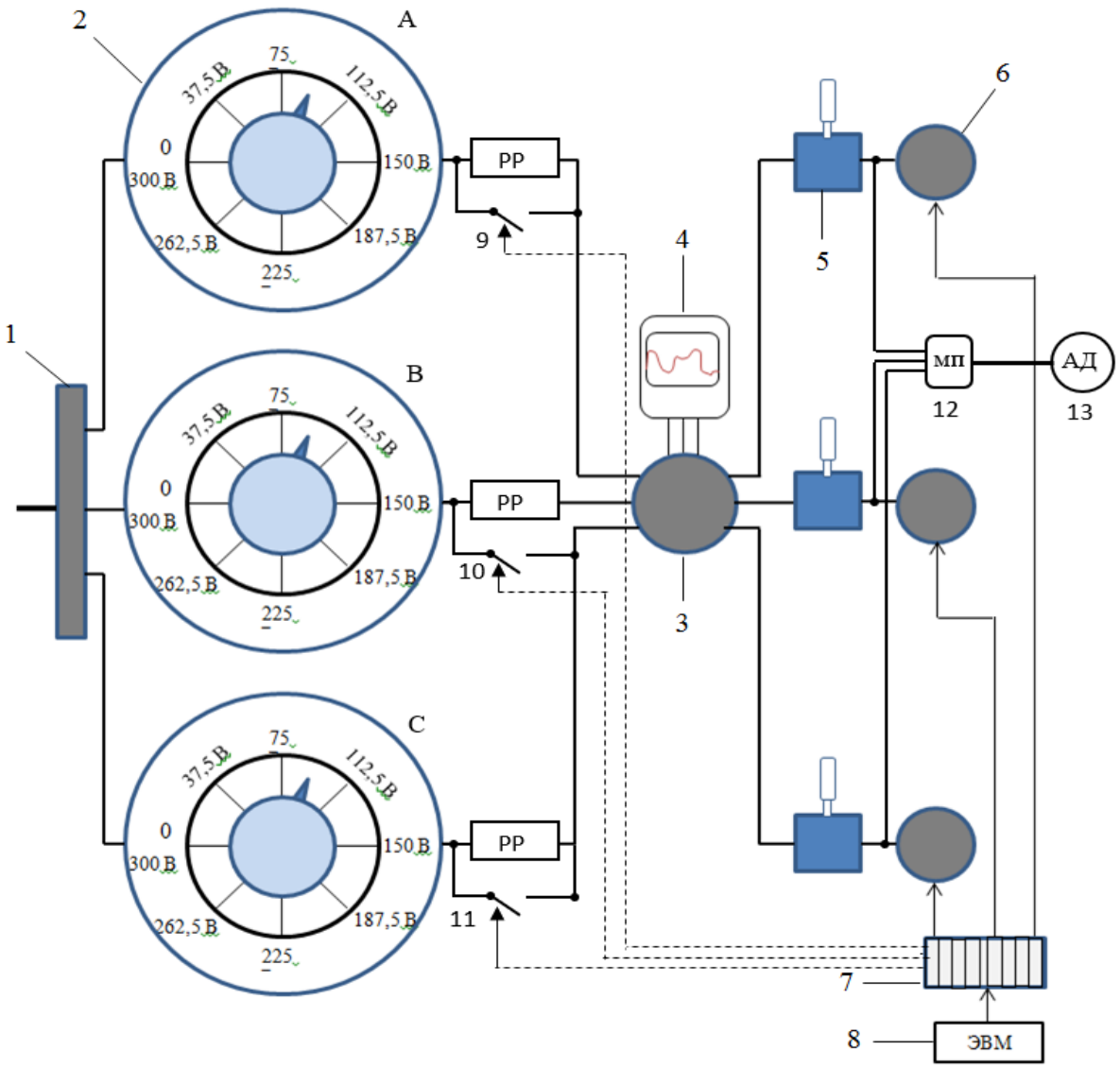

Рисунок 1 – Схема электрического соединения основных элементов экспериментальной установки с элементами АСНИ

3. Устройство для мониторинга и исследования гармонического состава линейных токов нагрузки [7, 8].

4. Двухлучевой осциллограф (FNIRSI – 1013D).

5. Устройство для калориметрического измерения потерь с датчиком температуры в количестве 3 штук на каждой фазе [9, 10].

6. Программно-управляемые от ЭВМ электрические нагрузки.

7. Устройство сопряжения экспериментальной установки с ЭВМ.

8. ЭВМ.

9. 10, 11 – коммутационные ключи в фазных проводах A, B, C для шунтирования или расшунтирования соответствующих регулируемых резисторов (РР).

12. Магнитный пускатель (МП) асинхронного двигателя (АД) – 13.

Рассмотрим более подробно специальные нетиповые устройства лабораторной установки. К ним относятся:

- устройство 3 (рис.1) для исследования гармонического состава магнитных полей от токов нелинейных нагрузок, а также для исследования гармонического состава токов в линейных проводах, питающих различные нелинейные нагрузки;
- калориметр с датчиком температуры 5 (рис.1);
- устройство сопряжения экспериментальной установки с ЭВМ, являющейся элементом АСНИ.

Устройства для исследования гармонического состава токов нелинейных нагрузок и магнитных полей от этих токов

Первое устройство конструктивно подобно асинхронной машине с фазным ротором (АМФР) небольшой мощности, работающей в трансформаторном режиме ($s = 1$), когда по соответствующим фазным обмоткам статора, состоящего из нескольких витков, протекают исследуемые линейные токи нагрузки (рис.2). Ротор такой машины может с помощью специального поворотного устройства занимать любое положение относительно статора.

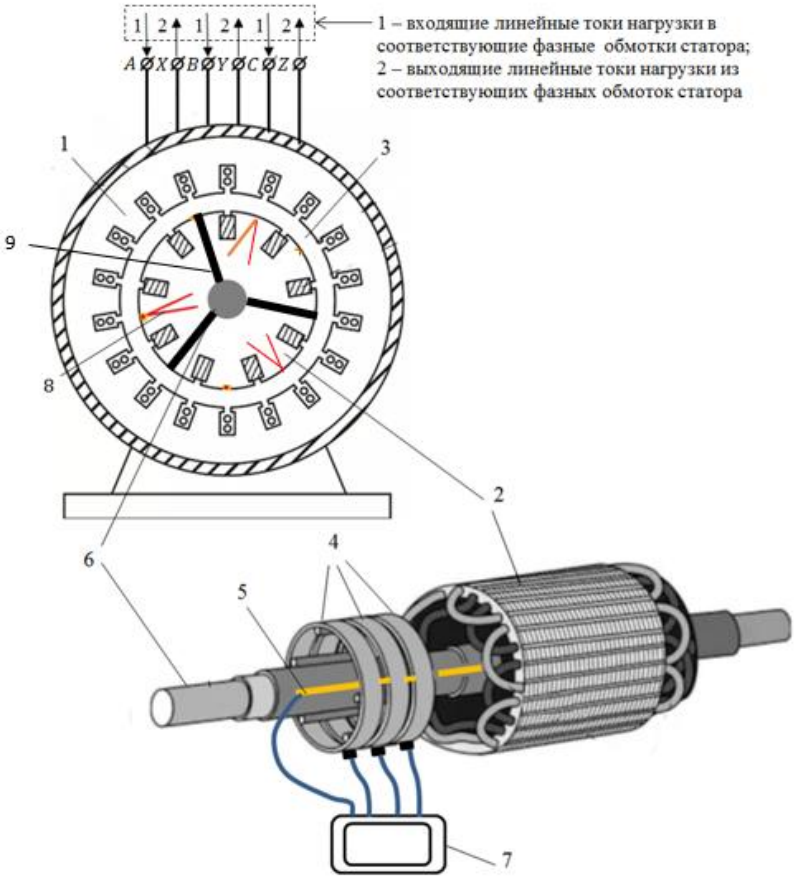

Рисунок 2 – АМФР, работающая в трансформатороном режиме

Конструктивно ротор разделен на три симметричных сектора, изолированных друг от

друга теплоизолирующими прокладками – 9. Температура поверхности ротора каждого сектора измеряется соответствующими датчиками температуры – 8.

АМФР (рис. 2) предназначена для исследования теплового действия гармонического состава магнитных полей от токов нелинейной нагрузки, где фазные обмотки статора разъедены, т.е. не имеют между собой гальванической связи, концы обмоток фазного ротора соединены в звезду, а общая точка соединения выведена наружу (рис. 3), свободные концы подведены к контактным кольцам. Для измерения температуры поверхности сердечника ротора использованы соответствующие датчики (8 — термопары).

Наведенные сигналы в фазных обмотках неподвижного ротора магнитными полями линейных токов нагрузки, протекающих по фазам статора, с помощью щеток, находящихся в скользящем контакте с кольцами, подаются для гармонического анализа на входы осциллографа 7 (рис.2, 3).

На рисунке 2 в развернутом и модифицированном виде показаны отдельные компоненты АМФР, работающей в трансформаторном режиме, где:

1 – сердечник статора с обмотками; 2 – сердечник ротора с обмотками; 3 – зазор между статором и ротором; 4 – контактные кольца; 5 – выведенный наружу проводник, соединяющий концы фазных обмоток ротора; 6 – вал; 7 – осциллограф; 8 – термопары; 9 – теплоизолирующие прокладки.

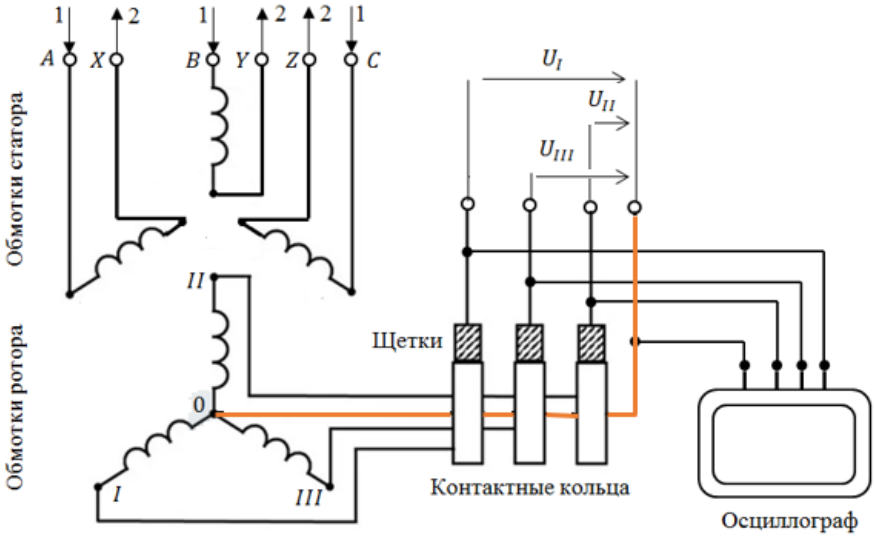

Рисунок 3 – Электрическая схема АМФР для исследования гармонического состава магнитных полей от токов нелинейной нагрузки

На рисунке 3 изображена электрическая схема АМФР, где 1, 2 – соответственно начало и конец статорной обмотки фаз A, B, C; I, II, III – начало роторной обмотки, соединенной в звезду, концы которых соединены в узле 0; U_I, U_{II}, U_{III} – наведенные напряжения в обмотках ротора относительно узла 0, значения которых подаются на сигнальные входы осциллографа.

Следует отметить, что когда асинхронные машины (в нашем случае с фазным ротором) используются по своему прямому назначению и подключены прямо в трехфазную сеть (рис. 4, a), то они являются для сети электрическими нагрузками, и потребляемые токи характеризуются параметрами самой машины (Z_A, Z_B, Z_C – комплексные сопротивления обмоток статора) и подчинены закономерностям, свойственным этим машинам. В нашем

случае, когда АМФР подключена как устройство для исследования гармонического состава линейных токов нагрузки (УИГС) (рис. 4, b), то сигналы, наведенные в фазных обмотках ротора (Z'_A, Z'_B, Z'_C – комплексные сопротивления обмоток статора, образованные небольшим количеством витков) от магнитных полей линейных токов нагрузки и снимаемые через контактные кольца, характеризуют характер влияния различных нагрузок на гармонические составы линейных токов.

На рисунке 4 изображены только фазные обмотки статора АМФР.

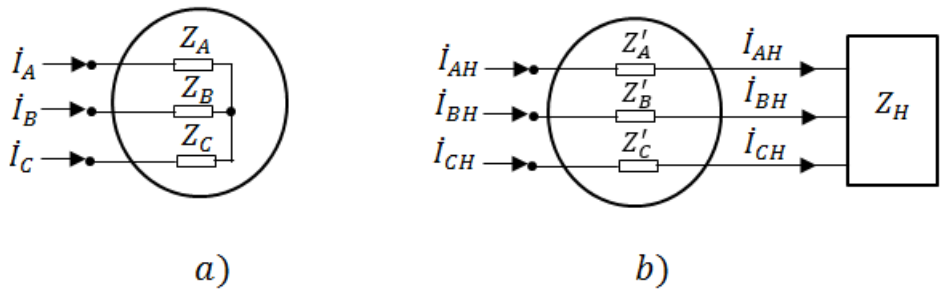

Рисунок 4 a – прямое подключение АМФР в трехфазную сеть;
b – подключение АМФР как устройства для исследования гармонического состава линейных токов нагрузки, Z_H

Второе устройство представляет собой *автотрансформаторный датчик тока*, предназначенный для исследования гармонического состава тока в линейных проводах от различных нелинейных нагрузок, например, светильник с люминесцентной лампой (рис. 6).

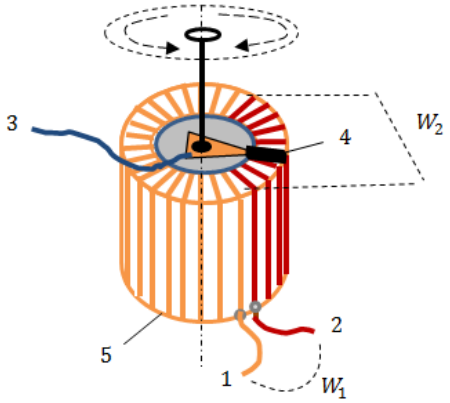

Рисунок 5 – Конструктивные элементы автотрансформаторного датчика тока

На рисунке 5 показаны основные конструктивные элементы автотрансформаторного датчика тока (АТДТ), который конструктивно подобен лабораторному автотрансформатору (ЛАТР). Их *отличие в том,* что часть обмотки W_1 намотана проводом большего сечения, так как по этой части обмотки протекает ток нагрузки, который может принимать большое значение. Количество витков этой части обмотки равно W_2. Обе обмотки выполнены медным проводом и намотаны на тороидальный магнитопровод 5. При этом скользящий контакт 4 перемещается по торцу обмотки W_2. Скользящий контакт 4 имеет гальваническую связь с проводом 3. Отличие АТДТ от ЛАТР заключается еще в том, что его вход является для ЛАТР выходом. На рисунках 5 и 6 нумерация элементов и обозначения обмоток идентичны. Для исследования влияния гармонического состава тока нелинейной нагрузки R на потери в физической модели проводника предназначена лабораторная установка (ЛУ) (рис. 6), с

помощью которой нагрузка подключена к зажимам (6-3) источника e.

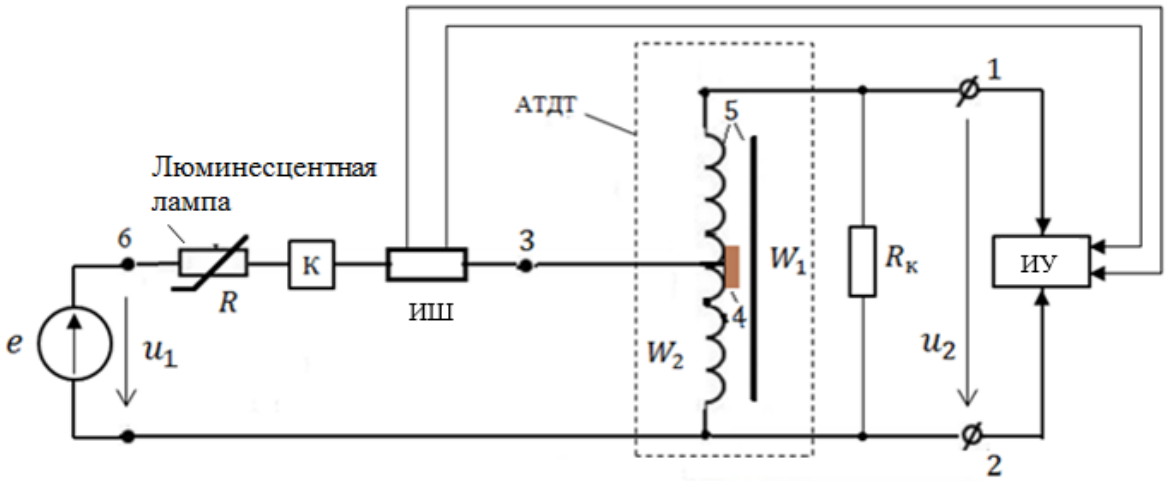

Рисунок 6 – Схема лабораторной установки с автотрансформаторным датчиком тока для исследования гармонического состава тока нагрузки и измерение потерь ЭЭ

На рисунке 6 принято следующее сокращение и обозначение элементов ЛУ: W_1 – количество витков обмотки АТДТ, концы которого выведены на зажимы (1-2); W_2 – некоторая часть витков обмотки W_1, намотанных проводом большего сечения, электрический сигнал с которого снимается скользящим контактом 4, имеющим гальваническую связь с зажимом 3. Обмотка W_1 намотана на тороидальный магнитопровод 5. ИШ – линейный измерительный шунт, R – люминесцентная лампа (ЛЛ), ИУ – измерительное устройство (прибор), которое в зависимости от поставленной задачи может быть вольтметром или осциллографом, $R_к$ – калиброванный резистор, К – калориметр.

ЛУ, представленная на рисунке 6, позволяет исследовать влияния на потери электроэнергии (ПЭ) в питающем однофазную нелинейную нагрузку проводе от искажения синусоидальности кривой тока (ИСКТ), вызванная этой нагрузкой, например люминесцентной лампой. При этом ЛУ позволяет исследовать влияния на ПЭ при одновременном изменении двух показателей качества электроэнергии, например ИСКТ и отклонения напряжения от номинального (ОН). Потери измеряется калориметром (К). Преимущество калориметрического способа (КС) измерения потери заключается в том, что в нем фиксируются все механизмы, вызывающие потери мощности, которые нагревают теплоносители калориметра. При этом надо учитывать инерционность процесса измерения, так как процесс нагрева теплоносителя калориметра за счет оглашенной потери ЭЭ требует некоторого времени.

Конструктивно АТДТ может быть в двух исполнениях, в первом случае обмотки намотаны на ферромагнитный сердечник, во втором – сердечник из немагнитного материала, следовательно, в первом случае датчик тока нелинейный, во втором – линейный.

В процессе эксперимента для визуализации сигналы, снимаемые с ИШ и с АТДТ через калиброванный резистор – $R_к$, подаются на входы ИУ. ИУ в данном случае представляет современный четырехлучевой цифровой осциллограф (ЧЛЦО). Программное обеспечение ЧЛЦО позволяет проводить спектральный анализ этих сигналов, представляющих падения напряжения в ИШ и $R_к$. В результате эксперимента может быть решена поставленная в работе задача.

Следует отметить, что ЭУ позволяет дополнительно изучить, насколько сигнал,

снимаемый с АТДТ через калиброванный резистор – $R_к$, отличается по спектральному составу от сигнала от ИШ. Очевидно, что основой этих сигналов является ток нагрузки, протекающий через нелинейный элемент – ЛЛ.

Устройство для калориметрического измерения потерь электроэнергии в физической модели элемента электрической сети

На основе изучения научных публикаций [9, 10, 11], где рассмотрены различные методы измерения потерь в элементах электрорадиотехники, находящиеся под электромагнитным воздействием, нами выбран калориметрический метод измерения потерь. По мнению исследователей, калориметрический метод является одним из чувствительных и точных методов экспериментальных исследований, позволяющих установить практически все причины, приводящие к потерям в исследуемых элементах.

На рисунке 7 показана предлагаемое в работе конструктивное исполнение устройства с калориметром для измерения потерь в физической модели элемента электрической (ФМЭ) сети.

Устройство состоит из калориметрической системы – 1, а также коммерчески доступного устройства для измерения температуры – 2, представляющего собой систему из АЦП, микроконтроллера и дисплея, расположенных в одном корпусе, а также отдельно отстоящую термопару – 3. Все эти элементы устройства скреплены на поверхность диэлектрической пластины – 4, которая жестко скреплена со стержнем 5 и вмонтирована в раму – 6.

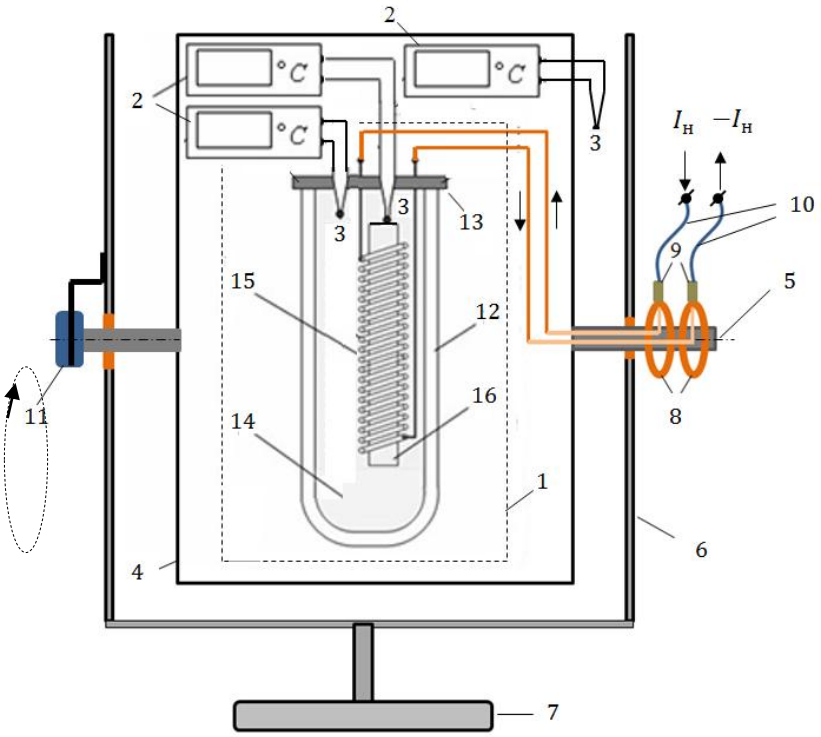

Рисунок 7 – Устройство с калориметром, содержащее необходимые элементы для проведения измерения тепловых потерь в физической модели элемента электрической сети

Рама установлена неподвижно на горизонтальной поверхности 7. Пластина 4 со

стержнем 5 имеет возможность вращаться (на рис. 7 *показано стрелкой вращение, скорость вращения медленная*) относительно рамы 6. При этом совместно с ними вращаются и два контактных кольца 8, которые жестко насажены на стержень 5. С контактными кольцами 8 соприкасаются щетки 9, имеющие скользящие контакты с ними, с помощью которых через одного из проводов 10 из сети подтекает исследуемый ток, направляющийся после прохождения через ФМЭ электрической сети в нагрузку по другому проводу 10, нагревая физическую модель.

Основным элементом калориметрической системы является прямоугольная пластина 16 из алюминия с выемкой для нагревателя – ФМЭ, помещенная в теплоизолированный корпус сосуда из стекла 12 (термос) (рис. 7).

Пространство между стеклом (стенка термоса) и блоком заполняются дистиллированной водой 14. Измерение температуры проводится термопарами, расставленными в различных точках калориметра, в том числе на стенке алюминиевой пластины и поверхности ФМЭ и на некотором расстоянии от нее. Напряжение с термопар поступает на МК через АЦП. На начальном этапе все элементы калориметра должны иметь одинаковые начальные температуры. Измерения должны проводиться через равные промежутки времени, устанавливаемые исследователем. В процессе эксперимента рама должна периодически раскачиваться или медленно вращаться, чтобы жидкость в сосуде 12 перемешивалась для установления равной температуры жидкости по всему объему сосуда 12.

Калориметр, использованный в работе [9, 10] для определения тепловых потерь в светодиодном модуле (СДМ), представлен на рисунке 8.

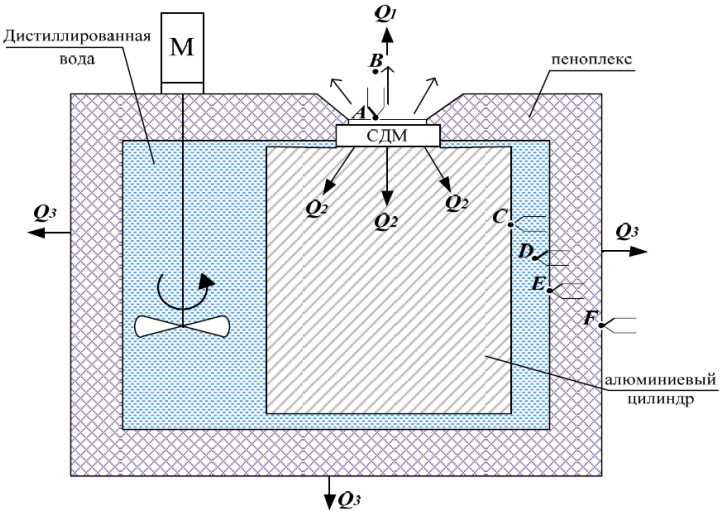

Рисунок 8 – Калориметр для измерения энергии тепловых потерь, в СДМ [9, 10]

Где Q_1 – энергия, испускаемая с поверхности СДМ; Q_2 – энергия, полученная калориметром; Q_3 – энергия, отданная калориметром в окружающую среду, которая складывается из излучаемой $Q_и$ энергии и энергии, уносимой конвекционным потоком $Q_к$.

На рисунке 7 эти тепловые величины Q_1, Q_2, Q_3, $Q_и$, $Q_к$ не показаны, но они существуют и аналогичные по смыслу.

Выделяемая в исследуемом элементе тепловая энергия Q определяется в виде суммы тепловых энергий:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (1)$$

Приведенные в выражении (1) тепловые величины определяются по соответствующим формулам термодинамики и теплопередачи [12]. Значение Q используется для расчета

потери электроэнергии в физической модели элемента электрической сети, при этом надо использовать известное эквивалентное соотношение:

$$1\ \text{кВт} \cdot \text{ч} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{Дж}.$$

Например, если в процессе эксперимента калориметром измерена выделенная тепловая энергия $0{,}548 \cdot 10^3$Дж, то она будет соответствовать $0{,}152 \cdot 10^{-3}$ кВт · ч электрической энергии, если эксперимент длился 20 минут, то потери мощности будут равны $0{,}506 \cdot 10^{-3}$ кВт $= 0{,}506$ Вт.

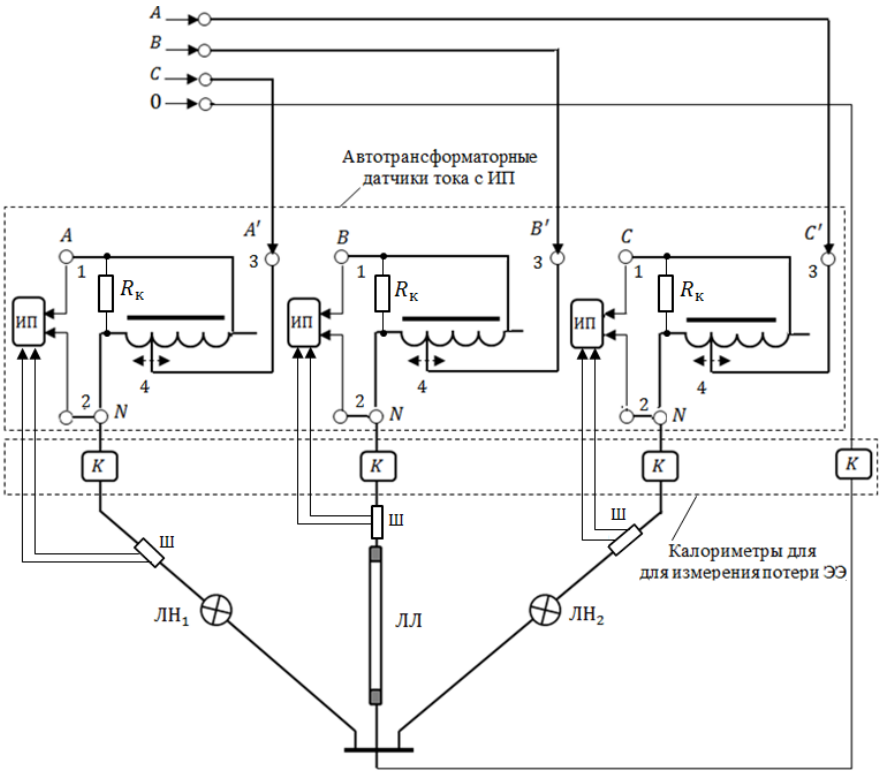

Рисунок 9 – Схема ЛУ для исследования гармонического состава тока в ЭП с нелинейными характеристиками и измерение потерь ЭЭ

На рисунке 9 – ЛН, ЛЛ соответственно светильники с лампами накаливания и люминесцентной лампой, а лабораторная установка (рис. 9), в отличие от ЛУ (рис. 6), предназначена для исследования влияния гармонического состава на потери в трехфазной несимметричной цепи. Как было сказано, потери электроэнергии в элементах цепи измеряются с помощью калориметра. **Процесс** функционирования установки аналогично работе ЛУ рисунка 6.

Заключение

1. Разработана экспериментальная установка с элементами АСНИ для автоматизации отдельных операций эксперимента в локальных микросетях электроснабжения (например, исследование дополнительных потерь при изменении качества электроэнергии).

2. Предложена схема лабораторной установки с автотрансформаторным датчиком тока для исследования гармонического состава тока нагрузки с нелинейными

характеристиками и калориметрический способ измерения потерь ЭЭ, который, по мнению исследователей, является одним из чувствительных и точных методов экспериментальных исследований, позволяющих установить практически все причины, приводящие к потерям в исследуемых элементах.

3. Модифицировано устройство с калориметром, содержащее необходимые элементы для проведения измерения тепловых потерь в физической модели элемента электрической сети.

Литература

1. Тимчук С. А., Мирошник А. А. Определение потерь электроэнергии в зависимости от ее качества в нечеткой форме в сельских распределительных сетях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т.1, №8 (73). – С. 4–10.
2. Боровиков В.С., Харлов Н.Н. Оценка добавочных потерь активной мощности и электроэнергии в линиях с высоким коэффициентом искажения синусоидальности тока // http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/ Conferences/2010/K02/1001.pdf.
3. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии / В. С. Боровиков, Н. Н. Харлов, Т. Б. Акимжанов. // Известия Томского политехнического университета / Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск, 2013. – Т. 322, № 4. – Энергетика. – С. 91–93.
4. 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.
5. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов [Текст] / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
6. Массов А. А., Козлов П. М., Кумаритов Б. Х., Кирилин И. В. Создание имитационной модели для выявления искажений форм кривых токов и напряжений в сетях рудников // Промышленная энергетика, 2011. – № 5. – С. 44–49.
7. Эралиева Г.Ш. Оценка изменения спектрального состава тока нагрузки при переходном процессе в линии электропередачи / Г.Ш. Эралиева // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2024. – № 3. – С. 27–33.
8. Сатаркулов К.А. Катушка индуктивности с новым способом намотки как устройство диагностики / К. Сатаркулов, Г.Ш. Эралиева, Г.Н. Ниязова, А.К. Асанов, Н.А. Суюнтбекова // Проблемы автоматики и управления. 2024. –№ 3 (51). – С. 28–36.
9. Савкова Т.Н. Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля / Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко // Вестник ТГТУ – 2013. – №3. – С. 88–92.
10. Савкова Т.Н. Определение средней рассеиваемой мощности светодиодным модулем / Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко, Е.Н. Подденежный, Ю.Н. Колесник, А.А. Бойко // Вестник ТГТУ. – 2015. – Т.2. – №2. – С. 273–278.
11. Суюнтбекова Н.А. Способ определения отдельных видов потерь электроэнергии в компонентах электрической сети на их физических моделях / Н.Т. Ниязов, Г.К. Усубалиева, У.А. Калматов, Н.А. Суюнтбекова // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. – С. 2765–2773.
12. Болгарский, А.В. Термодинамика и теплопередача: учеб.для вузов / А.В. Болгарский Г. А., Мухачев В. К., Щукин. – М.: Высш. шк., 1975. – 495 с.