

УДК 621.317.1

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОМПОНЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ИХ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Н.Т. Ниязов

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Кыргызская Республика, 720044, Бишкек, пр. Мира, 66
E-mail: niiazov54@mail.ru

Г.К. Усубалиева

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Кыргызская Республика, 720044, Бишкек, пр. Мира, 66
E-mail: gulnara.u@mail.ru

У.А. Калматов

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Кыргызская Республика, 720044, Бишкек, пр. Мира, 66
E-mail: ukalmatov@bk.ru

Н.А. Суюнтбекова

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Кыргызская Республика, 720044, Бишкек, пр. Мира, 66
E-mail: ukalmatov@bk.ru

Ключевые слова: определение потерь электроэнергии, коронирование, измерительный прибор, калориметр, физическая модель, калориметрический способ измерения потерь

Аннотация: В статье рассматривается избирательный способ определения отдельных видов потерь мощности и электроэнергии в составных частях электротехнического изделия на его физической модели с использованием калориметрического способа. Даны описания экспериментальных установок, изложены результаты проведенных на них экспериментов. Полученные результаты показали работоспособность предложенного способа. Предлагаемый способ измерения напряжения имеет незначительные габариты и массу, при этом обеспечивает непрерывное косвенное измерение постоянных и переменных напряжений с момента зажигания общей короны при минимальном отборе мощности измерительным каналом из выходной цепи.

1. Введение

Для проведения теоретических исследований с целью разработки новых методов расчета видов потерь в составных частях конструкции эксплуатируемого электрооборудования, а также для дальнейшего развития существующих методов необходимо развитие и экспериментальных методов исследования этих потерь с целью проверки адекватности разработанных аналитических методов расчета и теоретических моделей.

На практике часто возникает необходимость наличия информации о структуре потерь в элементах сети. Например, при исследовании влияния различных факторов на потери на корону в высоковольтных линиях надо уметь измерять по отдельности составляющие потерь, хотя бы используя физические модели этих линий. Или, например, при исследовании в сердечнике трансформатора потерь, обусловленных различными физическими явлениями только в самом сердечнике и т.д.

В принципе потери можно измерять с помощью приборов учета, фиксирующих поступающую и отпускаемую электроэнергию на рассматриваемой физической модели. Однако, использование существующих приборов не вполне корректно, так как результаты измерений мощности при искаженных токе и напряжении, что присуще современным электрическим сетям, могут давать погрешности выше допущенных по норме из-за их калибровки при чисто синусоидальных токе и напряжении [1, 2].

Проведение таких исследований в естественных условиях чрезвычайно сложно и требует больших финансовых затрат. Поэтому представляется наиболее целесообразным проведение экспериментальных исследований на физических моделях с использованием таких способов измерения потерь мощности и электроэнергии, на точность результатов которых не влияли бы отклонения временных зависимостей токов напряжений от синусоиды.

1.1. Постановка задачи

К настоящему моменту разработаны достаточно эффективные способы измерения потерь мощности и энергии в элементах электрической сети.

Что касается избирательного определения отдельных видов потерь электроэнергии в отдельных элементах конструкции, можно отметить работы [3, 4], где для определения потерь мощности использован калориметрический способ.

В данной работе сделана попытка дальнейшего развития предложенного в работах [3, 4] способа определения потерь в элементах сети с использованием их физических моделей.

Поставлены задачи проведения измерений, по данным которых вычисляются:

- Потери мощности от тех физических процессов, которые свойственны коронирующему проводу, на его физической модели при неизолированном варианте. Согласно [5], при защищенном варианте потери на корону отсутствуют. Для определения влияния однородности электрического поля на эти потери измерения проводились при различных конфигурациях электрического поля, создаваемого физической моделью провода, по отношению к другому электроду, когда между ними подана заданная разность потенциалов;
- Нагрузочные потери в проводе и потери в магнитном материале при повышенных частотах тока и напряжения.

2. Определение потерь мощности от коронирующего провода

2.1. Описание установки для проведения измерений

Основным элементом калориметрической системы 5 (рис. 1, рис. 2) является физическая модель провода 1, находящегося внутри стеклянной колбы (СК) 3, заполненной воздухом под определенным давлением. СК помещена в колбу 6 с вакуумной термоизоляцией.

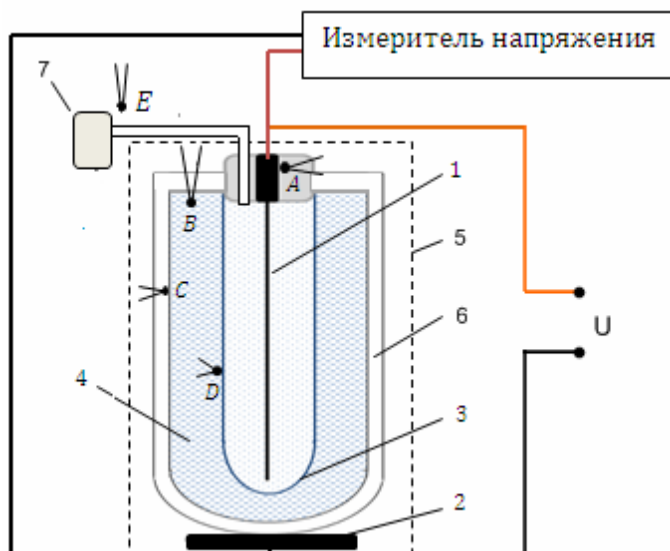


Рис. 1. Калориметрический способ измерения потерь от коронирующего провода при неоднородном электрическом поле.

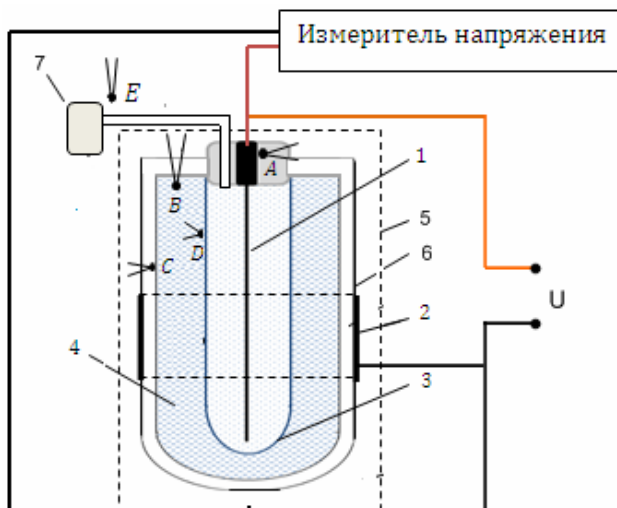


Рис. 2. Калориметрический способ измерения потерь от коронирующего провода при электрическом поле, близком к однородному.

Пространство между СК 3 и колбой 6 заполнялось диэлектрической жидкостью. Измерение температуры проводилось термопарами, установленными в различных точках калориметра (*A*, *B*, *C*, *D*), а также на некотором расстоянии от нее (*E*). Значение напряжения с термопар через помехозащищенный многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и устройство связи с объектом (УСО) поступало на ПК.

На начальном этапе все элементы калориметра имели одинаковую начальную температуру. С помощью устройства 7 в коронирующем объеме поддерживалось необходимое атмосферное давление. Регулируемое высокое напряжение подается на электрод 1 (физическая модель провода) и плоский электрод 2. При таких формах электродов коронирование провода 1 происходит в неоднородном электрическом поле (рис. 1).

Для исследования влияния конфигурации электрического поля на потери от коронирующего провода эксперимент проводился и для системы электродов, между которыми создается поле, близкое к однородному (рис. 2).

Измеритель напряжения, принцип действия которого приведен ниже по тексту определял разность потенциалов между электродами 1, 2.

Выделившаяся за счет коронирования провода и, возможно, других физических явлений в диэлектриках от воздействия переменного электрического поля и саккумулированная в исследуемом объекте (коронирующий провод, воздух, СК) тепловая энергия Q определяется в виде суммы тепловых энергий:

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

где $Q_1 = \sum c_i \cdot m_i \cdot \Delta T_i$ – суммарная тепловая энергия, саккумулированная диэлектрической жидкостью (ДЖ) и остальными элементами, находящимися в контакте с ДЖ; Q_2 – энергия, отданная калориметром в окружающую среду.

Формулу (1) используем для расчета потерь электроэнергии при всех физических процессах, происходящих в исследуемом блоке под воздействием переменного электрического поля высокой напряженности.

Для приближенной оценки величины Q_2 перед проведением основного эксперимента поставлен предварительный эксперимент, целью которого является установление закономерности изменения количества тепла, отдаваемого с поверхности используемого калориметра по времени при его остывании, начиная от известной начальной температуры жидкого диэлектрика, т.е. установление зависимости $Q_{ocm} = f(T, t)$, где t – текущее время, T – температура жидкого диэлектрика. При этом в сосуде калориметра содержится только диэлектрическая жидкость. Тогда, если продолжительность эксперимента составила, например, $\Delta t = t_2 - t_1$, t_1 – время начала, t_2 – время завершения эксперимента, то:

$$Q = Q_1 + \Delta Q_{ocm},$$

где $\Delta Q_{ocm} = f(T_1, t_1) - f(T_2, t_2)$ представляет собой количество тепловой энергии, рассеянной в окружающее пространство с поверхности калориметра за время эксперимента. В этом выражении: T_1 – температура жидкого диэлектрика в начале, T_2 – в конце эксперимента.

2.1.1. Данные о параметрах элементов установки и результаты эксперимента (рис. 1, рис. 2): 1 – медный провод длиной 165 мм, диаметром 0,23 мм. Регулирование напряжения производится с помощью лабораторного автотрансформатора. 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 начала зажигания короны. Диаметр провода 1 подобран таким, чтобы при напряжении провода более 1 кВ и нормальном атмосферном давлении на его поверхности зажглась устойчивая корона.

В ходе эксперимента длительностью 20 мин. на физическую модель провода было подано напряжение 20 кВ. В результате на ее поверхности зажглась устойчивая корона, при этом температура диэлектрической жидкости (трансформаторное масло) массой $m_g = 200$ г., прогрелась от начальной температуры $T_1 = 24,3$ °C до конечной температуры $T_2 = 25,6$ °C. Значение Q :

$$(2) \quad Q = Q_1 + \Delta Q_{ocm} = c_{tm} \cdot m_{tm} \cdot \Delta T + c_{np} \cdot m_{np} \cdot \Delta T + c_c \cdot m_c \cdot \Delta T + c_c \cdot m_{ck*} \cdot \Delta T$$

где c_{tm} – удельная теплоемкость трансформаторного масла (ТМ); m_{tm} – масса ТМ; c_{np} – удельная теплоемкость провода; m_{np} – масса провода; c_c – удельная теплоемкость стекла; m_c – масса стеклянной пробирки; m_{ck*} – масса внутренней нагреваемой части стеклянной колбы; $\Delta T = (T_2 - T_1)$, где T_1 , T_2 – начальная и конечная температуры элементов калориметра.

Так как масса стеклянной пробирки и провода значительно меньше массы воды, то вторым и третьим слагаемыми в выражении (2) можно пренебречь. Кроме того, из-за непродолжительности эксперимента можно считать $\Delta Q_{ост} = 0$. Тогда:

$$Q = c_{mm} \cdot m_{mm} \cdot \Delta T + c_c \cdot m_{ск*} \cdot \Delta T = 1,756 \cdot 0,2 \cdot 1,3 + 0,703 \cdot 0,1 \cdot 1,3 = \\ = 0,548 \text{ кДж} = 0,548 \cdot 10^3 \text{ Дж},$$

где

$c_{mm} = 1,756 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $m_{mm} = 0,2 \text{ кг}$; $c_c = 0,703$; $m_{ск*} = 0,1 \text{ кг}$, а масса всей стеклянной колбы $m_{ск} = 0,250 \text{ кг}$; $\Delta T_g = 25,6 - 24,3 = 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Известно, что $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$, следовательно, $0,548 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ будет соответствовать $0,152 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ электрической энергии. Так как эксперимент длился 20 минут, то потери мощности от коронирующего провода в нашем эксперименте составили $0,506 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} = 0,506 \text{ Вт}$.

2.2. Измеритель напряжения

Рассмотрим способ измерения напряжения с момента зажигания устойчивой короны на поверхности физической модели провода [4] с помощью измерителя напряжения (ИЗН).

Известны способы измерения и устройства, реализованные на их основе, для измерения высоких напряжений мощных энергетических установок. Они имеют большую массу и габариты измерительных устройств, а также характеризуются значительным потреблением мощности. По перечисленным показателям такие измерители не приемлемы для маломощных приборных источников.

Применяются также и лабораторные способы измерения высоких напряжений, связанные с использованием стационарных установок и оборудования. В связи с этим такие способы также не приемлемы для приборных источников [6].

Предлагаемый способ не обладает выше отмеченными недостатками и позволяет косвенное измерение напряжения с момента зажигания устойчивой короны по измеренному значению тока I в коронирующем промежутке. Для этого необходимо предварительно экспериментально установить функциональную зависимость $I = f(U)$, где I – ток в коронирующем промежутке; U – напряжение, величина которого больше напряжения зажигания короны U_n .

Следует отметить, что начальная стадия до коронного разряда существенно зависит от состояния поверхности электрода, например, шероховатости поверхности электрода или незначительные загрязнения могут стать очагами местных предварительных разрядов малой мощности, не имеющих устойчивого характера, и такие токи местных разрядов неустойчивы и очень малы. Только при достаточной длине провода с большой кривизной такие токи, суммируясь, образуют трудновоспроизводимые более или менее устойчивые значения. Определение начальных напряжений короны в таких условиях затруднительно. Только после хорошей полировки и чистки электродов можно говорить об определенном для данных условий (*геометрия поля, плотность и природа газа, влажность*) начальном или критическом напряжении возникновения короны. В таких случаях постепенное повышение напряжения приводит к внезапному скачкообразному переходу от ничтожно малого тока к току, измеряемому техническими приборами, значение которого определяется в основном напряжением и сопротивлением источника [6].

Из вышесказанного следует, что коронный разряд на проводе, а следовательно, и ток I в коронирующем промежутке зависят не только от напряжения провода U , но 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»: $I = f(U, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$. Для экспериментального определения однозначной зависимости $I = f(U)$, необходимо исключить влияние всех факторов – x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 кроме напряжения электрода. Для этого электроды определенных геометрических размеров и форм, после тщательной очистки и полировки, поместим в стеклянную колбу 1 (рис. 3) заданного размера и заполним аргоном до атмосферного давления, и эту колбу 1 запаяем, чтобы полностью исключить связь с внешней средой. Схема для определения зависимости $I = f(U)$ приведена на рис. 3.

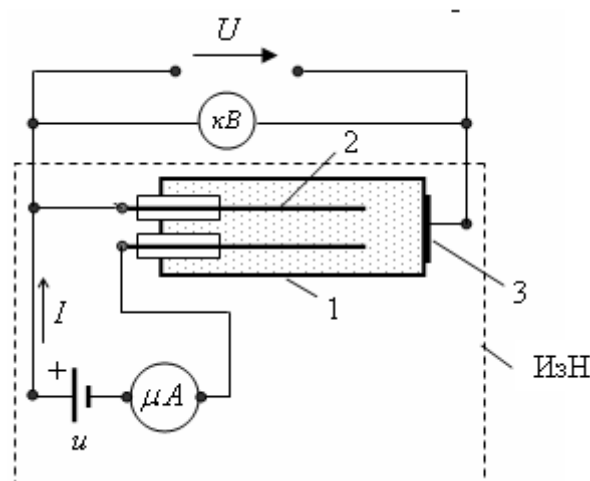


Рис. 3. Схема для установления функциональной зависимости значения измеренного микроамперметром тока I от величины напряжения U , приложенного между электродами 2 и 3, с момента возникновения устойчивого коронного разряда на электроде 2.

Результаты эксперимента занесены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментального определения функциональной зависимости $I = f(U)$ с помощью измерителя напряжения.

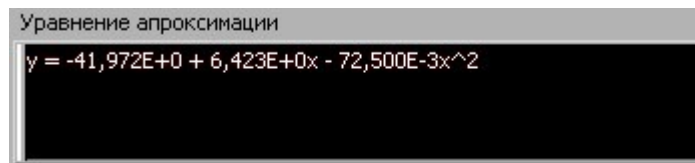
Результаты эксперимента						
$U, \text{кВ}$	$I, \text{мкА}$					
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_{cp}
10	15,3	14,7	15	15,1	14,9	15
12	24,8	25	25,4	24,5	25	24,94
14	34,6	35,2	30	30	35	32,96
16	49	41	40	40	45	43
18	49,8	50,3	50,4	49	50	49,9

Из-за нестабильности значения напряжения, поданного на электроды 2 (рис. 3), ток в коронирующей промежутке содержит случайную составляющую. Вследствие этого экспериментальные данные получены с некоторой погрешностью. Для определения уравнения аппроксимации $I = f(U)$ по данным эксперимента воспользовались математическими возможностями среды LabVIEW [7], т.е. соответствующим виртуальным прибором (ВП).

Полиномиальную аппроксимирующую функцию выбрали в виде [10]

$$f = \sum_{j=0}^m a_j x_i^j,$$

где f – последовательность выходных результатов аппроксимирующего полинома, x – входная последовательность; a – коэффициенты аппроксимирующего полинома; m – порядок полинома. После ввода в ВП результатов эксперимента (таблица 1) получено уравнение аппроксимации (рис. 4).



Уравнение аппроксимации

$$y = -41,972E+0 + 6,423E+0x - 72,500E-3x^2$$

Рис. 4. Уравнение аппроксимации, полученное в среде LabVIEW виртуальным прибором.

3. Определение нагрузочных потерь и потерь в магнитном материале при повышенных частотах тока и напряжения

В этом разделе статьи рассмотрена вторая задача, поставленная в работе, т.е. проведено избирательное определение нагрузочной потери в проводе и потери в ферромагнитном материале при частоте 200 Гц.

Проведен эксперимент, по результатам которого вычислена нагрузочная потеря в проводе и потери в ферромагнитном сердечнике на физической модели катушки индуктивности при частоте тока и напряжения 200 Гц.

3.1. Описание установки и хода эксперимента

Схема установки представлена на рис. 5а, где ТПТ – трехфазный понижающий трансформатор (380/42 В); ПЧ – преобразователь частоты (50/200 Гц); АД – асинхронный двигатель (90 Вт, 36 В, 200 Гц); ИзП – измеритель потери.

На каждой фазе, по которой энергия подается в АД, последовательно соединены физическая модель катушки индуктивности (КИ) с сердечником из ферромагнитного материала. Цель эксперимента – определить потери в сердечнике. Алгоритм: сначала определим суммарные потери в проводе и в сердечнике, затем потери в обмоточном проводе, а затем потери непосредственно в сердечнике как математическую разность двух первых величин.

Конструктивное исполнение ИзП представлено на рис. 5б: 1 – крышка из теплоизолирующего материала; 2 – корпус ИзП, в виде стеклянной колбы с вакуумной термоизоляцией массой 225 г.; 3 – сердечник в виде пластины из ферромагнитного материала массой 8 г.; 4 – обмоточный медный провод диаметром 0,15 мм длиной 6 м; 5 – трансформаторное масло (ТМ) массой 525 г.

В ТМ находится физическая модель элемента электрической сети, в которой измеряются потери электроэнергии.

Измерение температуры ТМ осуществляется термпарой 6. Значение температуры выводится на индикатор 7. Считаем, что температуры всех элементов, соприкасающихся с ТМ, одинаковы и равны температуре ТМ.

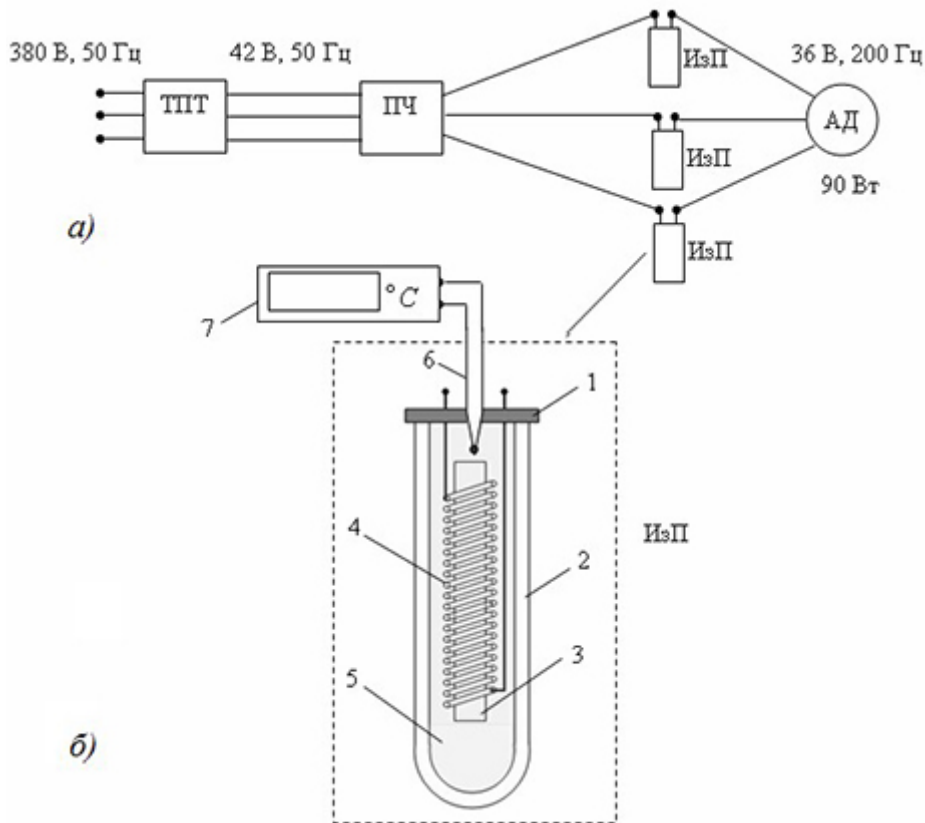


Рис. 5. Схема установки для измерения нагрузочных потерь электроэнергии в проводе и ферромагнитном материале при частоте тока и напряжения 200 Гц.

3.1.1. Данные эксперимента, по которым вычисляем суммарные потери:

- средняя температура ТМ на каждой фазе в начале эксперимента равна 23,4 °С;
- эксперимент длился 6 мин.;
- средняя температура ТМ на каждой фазе в конце эксперимента стала равной 49,8 °С.

3.1.2. Результаты расчета. Значение Q (1) приблизительно равно Q_1 , т.к. из-за малой продолжительности эксперимента можно считать $\Delta Q_{ост} \approx 0$. Значение Q_1 складывается из тепловой энергии, расходуемой на нагрев ТМ, провода, внутренней области стеклянной колбы и железной пластины (ЖП), т.е.:

$$Q \approx Q_1 = Q_{тм} + Q_{пр} + Q_c + Q_{жс} = \\ = c_{тм} \cdot m_{тм} \cdot \Delta T + c_{пр} \cdot m_{пр} \cdot \Delta T + c_c \cdot m_c \cdot \Delta T + c_{жс} \cdot m_{жс} \cdot \Delta T$$

где $c_{тм}$ – удельная теплоемкость ТМ; $m_{тм}$ – масса ТМ; $m_{пр}$ – масса провода; $c_{пр}$ – удельная теплоемкость провода; c_c – удельная теплоемкость СК; m_c – масса СК; $m_{жс}$ – масса ЖП; $c_{жс}$ – удельная теплоемкость ЖП; $\Delta T = (T_2 - T_1)$ где T_1 , T_2 – начальная и конечная температуры элементов калориметра.

Учитывая, что масса провода значительно меньше массы воды, вторым слагаемым можно пренебречь.

Итак:

$$Q_{тм} = c_{тм} \cdot m_{тм} \cdot \Delta T = 1,756 \cdot 0,525 \cdot 26,4 = 23,0908 \text{ кДж} = \\ = 0,02309 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 23,1 \text{ Дж}; \\ Q_c = c_c \cdot m_c \cdot \Delta T = 0,703 \cdot 0,1 \cdot 26,4 = 1,855 \text{ Дж};$$

$$Q_{ж} = c_{ж} \cdot m_{ж} \cdot \Delta T = 0,444 \cdot 0,008 \cdot 26,4 = 0,103 \text{ Дж};$$

$$Q = 23,1 + 1,855 + 0,103 = 25,1 \text{ Дж},$$

что эквивалентно 0,007 Вт·ч электрической энергии. Эксперимент длился 6 мин., поэтому мощность суммарной потери $Q \approx 0,07$ Вт.

3.2. Определение потери в обмоточном проводе катушки индуктивности с сердечником

Для решения поставленной задачи обмоточный провод той же длины, что и в предыдущем эксперименте, намотан на тот же сердечник бифилярно.

Данные эксперимента, по которым вычисляем потери только в обмоточном проводе, следующие:

- средняя температура ТМ на каждой фазе в начале эксперимента было равна 23,4 °С;
- эксперимент длился 6 мин.;
- средняя температура ТМ на каждой фазе в конце эксперимента стала равной 47,6 °С.

Аналогичные расчеты показали, что потери электроэнергии в обмоточном проводе катушки индуктивности за 6 мин. равны 0,0067 Вт·ч, потери мощности 0,067 Вт.

Потери мощности от вихревых токов в сердечнике равны 0,07-0,067=0,003 Вт.

4. Заключение

Результаты эксперимента показали работоспособность предложенного способа, который позволяет определять различные виды потерь на отдельных составляющих элементов электрической сети, используя их физические модели.

Кроме того, предлагаемый способ измерения напряжения обеспечивает непрерывное косвенное измерение постоянных и переменных напряжений с момента зажигания общей короны при минимальном отборе мощности измерительным каналом из выходной цепи, а также имеет незначительную массу и габариты.

Список литературы

1. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Shepherd W., Zand P. Energy Flow and Power Factor in Non-sinusoidal Circuits. New York: Cambridge University Press, 1979.
3. Савкова Т.Н., Кравченко А.И. Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2013. № 3. С. 88-92.
4. Айдарова А.Р., Усубалиева Г.К., Кадыров Ч.А., Сатаркулов К.А. Способ измерения напряжения с момента зажигания общей короны на поверхности физической модели провода // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2017. № 1 (41) часть I. С. 15-20.
5. Вихарев А.П., Вильнер А.В. Коронный разряд на воздушных ЛЭП 110 кВ с защищенными проводами // Инновационные технологии нового тысячелетия: сборник статей Международной научно-практической конференции. Киров, 5 мая 2016 г. Уфа: АЭТЕРНА, 2016. С. 13-18.
6. Вахов В.Ф., Лавринович В.А., Лопаткин С.А. Техника высоких напряжений. Курс лекций для бакалавров направления 140200 «Электроэнергетика». Томск: Издательство ТПУ, 2006.
7. Евдокимов Ю.К. LabVIEW в научных исследованиях. М.: ДМК-Пресс, 2012.