РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА УТЕЧКИ ПРИ ИСПЫТАНИИ ИЗОЛЯЦИИ ПОВЫШЕННЫМ ВЫПРЯМЛЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Р.Т. Хазиева, А.В. Мухаметшин

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия
khazievart@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. При разработке источников испытательного напряжения на постоянном токе для оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования стоит задача измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи авторами предложено техническое решение измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением, в котором используются прецизионный резистор, изолирующий усилитель, двухканальный операционный с однополярным питанием, усилитель с нулевым дрейфом напряжения и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье в ходе исследования стенда схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением создан опытно-промышленный образец, позволяющий производить измерения значения тока утечки в пределах от 10 мкА до 1000 мкА. Применение разработанной схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением, позволяет производить вычисление постоянной составляющей сигнала напряжения из переменного сигнала и в реальном масштабе времени, и, следовательно, оперативно контролировать ток в высоковольтных цепях для постоянного мониторинга. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Таким образом, внедрение данного образца позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных микроамперметров, позволяющих производить измерение тока утечки в высоковольтных испытательных установках для испытания изоляции объектов с большой ёмкостью (от 1 нФ до 200 нФ), в диапазоне измерения тока утечки от 10 мкА до 1000 мкА. Полученные результаты могут быть использованы в технике высокого напряжения для исследования схем измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением.

Ключевые слова: испытание изоляции; ток утечки; повышенное напряжение; выпрямленное напряжение; высоковольтная испытательная установка; испытуемый объект; резонанс.

Для цитирования: Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В. Разработка и исследование схемы измерения тока утечки при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 145-155. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-145-155.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE CIRCUIT FOR MEASURING THE LEAKAGE CURRENT WHEN TESTING THE INSULATION WITH THE HIGHER RECTIFIED VOLTAGE

RT. Khazieva, AV. Mukhametshin

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia
khazievart@mail.ru

Abstract: OBJECT. When developing DC test voltage sources to assess the insulation quality of high-voltage equipment, the task is to measure the leakage current flowing through the test object.. METHODS. When solving the problem the authors proposed a technical solution for measuring

the current flowing through the test when testing insulation with rectified voltage, which uses a precision resistor, an isolating amplifier, a 2-channel operational amplifier with a unipolar power supply, zero voltage drift, and an ADC of a microcontroller. **RESULTS.** The article in the course of the study of the stand of the circuit for measuring the leakage current flowing through the tested object when testing the insulation with rectified voltage, an experimental industrial sample was created, which makes it possible to measure the leakage current value in the range from 10 μA to 1000 μA . The use of the developed circuit for measuring the current flowing through the test object when testing the insulation with rectified voltage makes it possible to calculate the DC component of the voltage signal from the alternating signal and in real time, and, therefore, to quickly monitor the current in high-voltage circuits for continuous monitoring. **CONCLUSION.** So the introduction of this sample will make it possible, on its basis, to create a number of digital measuring microammeters that make it possible to measure the leakage current in high-voltage test installations for testing the insulation of objects from 15 nF to 200 nF, in the leakage current measurement range from 10 μA to 1000 μA . The results obtained can be used in high voltage technology to study circuits for measuring the leakage current flowing through the test object when testing insulation with rectified voltage.

Key words: insulation test; leakage current; overvoltage; rectified voltage; high voltage test set; test object; resonance.

For citation: Khazieva RT, Mukhametshin AV. Development and research of the circuit for measuring the leakage current when testing the insulation with the higher rectified voltage. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(4):145-155. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-145-155.

Введение и литературный обзор

В период эксплуатации изоляция высоковольтного электрооборудования подвергается механическим (кручение, изгиб, растяжение, сжатие), тепловым (перегрев, приводящий к ухудшению свойств изоляции), электрическим (перенапряжения и испытательные напряжения), влажности (увлажнение) и другим видам воздействия [1-4].

Все виды воздействия на изоляцию высоковольтного электрооборудования вызывают в ней сложные необратимые процессы, которые, приводят к преждевременному старению [5-8]. Поэтому для поддержания ее в исправном состоянии, согласно требованиям СТО 34.01-23.1-001, РД-29.020.00-КТН-014-18, заводских норм и руководящих документов, требуется периодическая проверка качества изоляции в процессе эксплуатации [9-11]. Один из главных критериев оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования является испытание повышенным выпрямленным напряжением с измерением тока утечки через испытуемый объект, после которого разрешается проводить испытание повышенным переменным синусоидальным напряжением [12-14]. В качестве источника высокого выпрямленного напряжения используется резонансная испытательная установка, резонанс в которой создается в первичном контуре высокопотенциального повышающего испытательного трансформатора [15-18]. В процессе испытания выпрямленным напряжением согласно ГОСТ Р 55194-2012 требуется измерение длительного тока утечки, который является установившимся постоянным током, протекающим через испытуемый объект после устранившихся до нуля емкостного тока и тока абсорбции [19-21].

Материалы и методы

В современных приборах для измерения постоянного тока применяются прецизионные резисторы, датчики тока на основе эффекта Холла разомкнутого и замкнутого типа [22-24].

Для исследования работы схемы измерения выпрямленного тока от 10 мкА до 1000 мкА в резонансной испытательной установке при испытании изоляции выпрямленным напряжением до 24000 В для объектов с большой емкостью (от 1 нФ до 200 нФ) номинальным напряжением до 10 кВ используется прецизионный резистор типа C2-29В отечественного производителя АНО «НПО» «ЭРКОН», сигнал (падение напряжения) с которого поступает и усиливается на усилитель №1 изолирующего типа АМС1301 производства «Texas Instrument» с коэффициентом усиления $k_1=8,2$ и с выхода усилителя №1 изолирующего типа сигнал подается на усилитель №2 на базе 2-х канального операционного усилителя с однополярным питанием, нулевым дрейфом напряжения типа AD8572ARZ производства Analog Devices, с коэффициентом усиления $k_2=4,0$. Сигнал с усилителя №2 усиливается и происходит передача его на каскад модулятора, в котором происходит преобразование аналоговых выборок сигнала в поток информации и передача

на АЦП маломощного микроконтроллера типа *STM32L476VGT6 Cortex-M4*, 80 МГц производства фирмы «*ST Microelectronics*».

Результаты

Схема измерения тока утечки, протекающего, через испытуемый объект, при испытании высоковольтной изоляции повышенным выпрямленным напряжением представлена на рисунке 1.

Рис. 1. схема измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением: 1 – сеть, 220 В, 50 Гц; 2 – регулятор напряжения от 0 до 220 В; 3 – резонансный дроссель; 4 – конденсатор; 5 – повышающий высокопотенциальный испытательный трансформатор; 6 – выпрямительный диод; 7 – испытуемый объект; 8 – прецизионный резистор; 9 – усилитель №1, изолирующий; 10 – усилитель №2, 11 – АЦП

Fig. 1. scheme for measuring the leakage current flowing through the test object when testing insulation with an increased rectified voltage: 1 – network, 220 V, 50 Hz; 2 – voltage regulator from 0 to 220 V; 3 – resonant choke; 4 – capacitor; 5 – increasing high-potential test transformer; 6 – rectifier diode; 7 – test object; 8 – precision resistor; 9 – amplifier No. 1, isolating; 10 – amplifier No. 2, 11 – ADC

Стенд для исследования схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением разработан и исследован в лаборатории кафедры ЭЭП УГНТУ при финансовой поддержке компании ООО НИЦ «Энергодиагностика».

Экспериментальный стенд для исследования схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением с использованием прецизионного резистора представлен на рисунке 2.

Рис. 2. экспериментальный стенд для исследования схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением: а) 1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) типа TDGC2-5K; 2 – осциллограф типа GDS-71022; 3 – усилитель №1 изолирующий типа AMC1301; 4 – источники опорного напряжения; 5 – цифровой мультиметр типа UT81B в режиме измерения переменного напряжения; б) 1 – прецизионный резистор типа C2-29B; 2 – усилитель №1 изолирующий типа AMC1301; 3 – усилитель №2 на базе операционного усилителя AD8572ARZ

Fig. 2. An experimental stand for studying the circuit for measuring the leakage current flowing through the test object when testing insulation with an increased rectified voltage: а) 1 – a laboratory autotransformer (LATP) of the TDGC2-5K type; 2 – an oscilloscope of the GDS-71022 type; 3 – an isolating amplifier No. 1 of the AMC1301 type; 4 – reference voltage sources; 5 – a digital multimeter of the UT81B type in the AC voltage measurement mode; б) 1 – precision resistor type C2-29B; 2 – isolating amplifier No. 1 of the AMC1301 type; 3 – amplifier No. 2 based on the AD8572ARZ operational amplifier.

Для исследования схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением выбран изолирующий усилитель типа AMC1301 производства «*Texas Instrument*». Выбранный изолирующий усилитель создает барьер для электромагнитных потерь между измерительными входами и остальной частью системы, и создаёт гальваническую развязку до 7 кВ. Основное достоинство данной микросхемы – это защита входной части микросхемы от тока помех и высокого напряжения, что не дает входным напряжениям

иметь связь с землей системы, тем самым обеспечивается защита АЦП микроконтроллера типа STM32L476VGT6.

На рисунке 3 представлена функциональная блок-схема изолирующего дифференциального усилителя типа AMC1301 производства «Texas Instrument» [2].

Рис. 3. функциональная блок-схема изолирующего усилителя типа AMC1301: 1 – дифференциальный усилитель; 2 – каскад модулятора; 3 – источник опорного напряжения 1; 4 – передача данных, Tx; 5 – приём данных, Rx; 6 – приём данных, Rx; 7 – передача данных Tx; 8 – осциллятор; 9 – фильтр; 10 – источник опорного напряжения.

Fig. 3. Functional block diagram of an isolating amplifier of the AMC1301 type: 1-differential amplifier; 2-modulator cascade; 3-reference source 1; 4-data transmission, Tx; 5-data reception, Rx; 6-data reception, Rx; 7-data transmission Tx; 8-oscillator; 9-filter; 10-reference voltage source.

Исследование схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением, проводится по алгоритму, представленному на рисунке 4 и схеме на рисунке 5 [1].

Рис. 4. Алгоритм проведения исследования схемы измерения тока утечки протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции выпрямленным напряжением

Fig. 4. Algorithm for conducting a study of the circuit for measuring the leakage current flowing through the test object when testing the insulation with a rectified voltage

Сухой повышающий высокопотенциальный испытательный трансформатор, обозначенный цифрой 5 на рисунке 5, для исследования предоставлен компанией ООО НИЦ «Энергодиагностика» (г. Уфа). Прецизионный резистор, обозначенный цифрой 10 на рисунке 5, имеет погрешность сопротивления не больше $\pm 0,25\%$.

Рис. 5 Схема измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением: 1 – сеть, 220 В, 50 Гц; 2 – регулятор напряжения типа TDGC2-5K; 3 – резонансный дроссель; 4 – импульсный конденсатор с комбинированным диэлектриком типа К75-40; 5 – повышающий высокопотенциальный испытательный трансформатор; 6 – прецизионный микроампервольтметр постоянного тока типа М2042; 7 – выпрямительный диод; 8 – осциллограф типа GDS-71022; 9 – испытуемый объект (ёмкостная нагрузка от 15 нФ до 65 нФ); 10 – прецизионный резистор типа C2-29В; 11 – усилитель №1 изолирующий типа AMC1301; 12 – усилитель №2 на базе операционного усилителя AD8572ARZ; 13 – АЦП микроконтроллера типа STM32L476VGT6; 14 – LCD модуль TFT 3,97 дюйма с драйвером NT3551

Fig. 5. A diagram of measuring the leakage current flowing through the test object when testing insulation with an increased rectified voltage: 1 – a network, 220 V, 50 Hz; 2 – a voltage regulator of the TDGC2-5K type; 3 – a resonant choke; 4 – a pulse capacitor with a combined dielectric of the K75-40 type; 5 – an increasing high – potential test transformer; 6 – a precision DC microampervoltmeter of the M2042 type; 7 – a rectifier diode; 8 – an oscilloscope of the GDS – 71022; 9 – test object (capacitive load from 15 nF to 65 nF); 10 – precision resistor type C2-29V; 11 – isolating amplifier No. 1 of the AMC1301 type; 12 – amplifier No. 2 based on the AD8572ARZ operational amplifier; 13 – ADC of the STM32L476VGT6 microcontroller type; 14 – 3.97-inch TFT LCD module with the NT3551 driver

Согласно алгоритму [1], приведенному на рисунке 4, произведем исследование схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением.

1. Расчет и выбор прецизионного резистора

Расчётное падение напряжения на прецизионном резисторе типа C2-29В:

$$U = I \cdot R, \quad (1)$$

где I – ток протекающего через испытуемый объект, мкА R – сопротивление прецизионного резистора типа C2-29В, Ом.

$$U = 100 \cdot 57 = 5,7 \text{ мВ.}$$

2. Проверка выборочной точки для проверки работы схемы

2.1 Установим ток утечки, протекающего через испытуемый объект равный 100 мкА при помощи образцового микроамперметра 6 рисунка 5, при плавном подъеме испытательного напряжения.

На рисунке 6 представлена осциллограмма напряжения (переменная составляющая сигнала при токе 100 мкА) на прецизионном резисторе типа C2-29В при испытании объекта ёмкостью 15 нФ. Из осциллограммы, представленной на рисунке 6 для схемы на рисунке 5, получены данные, которые представлены в таблице 1.

Рис. 6. Осциллограмма напряжения на прецизионном резисторе типа C2-29В при токе утечки 100 мкА

Fig. 6. Voltage waveform on a precision resistor of type C2-29V at a leakage current of 100 M

На рисунке 7 представлены осциллограммы напряжений на дифференциальном выходе изолирующего усилителя типа AMC1301. На рисунке 8 представлены осциллограммы напряжений на выходе усилителя №2 подаваемые на вход АЦП микроконтроллера типа STM32L476VGT6. Из осциллограммы, представленной на рисунке 7 и 8 для схемы на рисунке 5, получены данные, представленные в таблице 1.

Рис. 7. Осциллограмма напряжения дифференциального выхода усилителя №1

Fig. 7. Oscillogram of the voltage of the differential output of amplifier No. 1

Уровень входного напряжения для АЦП микроконтроллера типа *STM32L476VGT6* устанавливается опорным напряжением +2,5 В. АЦП микроконтроллера типа *STM32L476VGT6* разрешением 12 бит, может выдать $2^{12}=4096$ уровней квантования, 1 бит (шум) АЦП составит:

$$\frac{U_1}{N} = \frac{2,5}{4096} = 610,35 \text{ мкВ}, \quad (2)$$

где U_1 – уровень опорного напряжения, N – уровень квантования.

Таблица 1

Результаты экспериментов			
№ п/п	Измеренный и расчетные параметры для ёмкости объекта:	Емкость объекта 15 нФ	Емкость объекта 200 нФ
1	Измеренное напряжения на ЛАТРе, В	111	220
2	Измеренное выходное напряжения на испытуемом объекте, В	12000	24000
3	Амплитудное значение напряжения на входе усилителя, мВ	5,7	57,0
4	Амплитудное значение напряжения на выходе усилителя №1, мВ	46,74	467,4
5	Амплитудное значение напряжения на выходе усилителя №2, мВ	186,96	1870
6	Количество квантов с АЦП	306	3072
7	Измеренный ток на образцовом микроамперметре, мкА	100	1000
8	Показание измеренного тока на LCD модуле, мкА	101,2	982,1
9	Погрешность измерения тока, %	1,2	1,82

Для микроконтроллера типа *STM32L476VGT6* написана программа для вычисления среднеквадратичного сигнала за один период 20 мс и вычисление из него постоянной составляющей сигнала напряжения.

а) $T=10 \text{ мсек}$

б) $T=2,5 \text{ мсек}$

Рис. 8. Осциллограмма напряжения на выходе усилителя №2 (на входе АЦП)

Fig. 8. Voltage waveform at the output of amplifier No. 2 (at the ADC input)

На рисунке 9 представлена экспериментальная зависимость уровней квантования от тока утечки на образцовом микроамперметре в режиме калибровки для экспериментального

образца. По данной зависимости при максимальном токе 1000 мкА АЦП преобразовывает данное значение в 3072 кванта и программным путем происходит вычисление среднеквадратичного сигнала за один период 20 мс и вычисление из него постоянной составляющей сигнала напряжения. Из рисунка видно, что данная схема исследования позволяет производить измерение тока утечки только до 1000 мкА, а при токах больше 1000 мкА происходит увеличение квантов по нелинейной зависимости. Область тока выше 1000 мкА для обработки не рассматриваем.

Рис. 9. зависимость количества уровней квантования от тока на образцовом амперметре в режиме калибровки экспериментального образца

Fig. 9. Dependence of the number of quantization levels on the current on the sample ammeter in the calibration mode of the experimental sample

Обсуждение результатов

По результатам исследования создан опытно-промышленный образец схемы измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением, представленный на рисунке 10. Опытно-промышленный образец включает в себя монтажную плату №1 и №2. Монтажная плата №1 состоит из усилителя №1 изолирующего типа AMC1301 производства «Texas Instrument», усилителя №2 на базе операционного усилителя AD8572ARZ производства Analog Devices, фильтра, дросселя, источника высокоточного опорного напряжения. Плата №1 служит для снятия сигнала с прецизионного резистора типа C2-29B, усиления и передачи в плату №2. Плата №2 состоит из преобразователя типа STM32L476VGT6 производства фирмы «ST Microelectronics», фильтров, источника высокоточного опорного напряжения.

Рис. 10. Опытно-промышленный образец измерения тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением:
1 – плата №1 состоящая из усилителя №1 изолирующего типа AMC1301 производства «Texas Instrument» и усилителя №2 на базе операционного усилителя AD8572ARZ производства Analog Devices; 2 – плата №2 состоящая из микроконтроллера типа STM32L476VGT6 и источников опорного напряжения.

Fig. 10. Pilot sample measurement of leakage current flowing through the test object during the insulation test high DC voltage:

1 Plata No. 1 consisting of amplifier No. 1 insulation type AMC1301 production «Texas Instrument» and amplifier No. 2 on the basis of the operational amplifier AD8572ARZ production Analog Devices; 2 Plata No. 2 consists of the microcontroller type STM32L476VGT6 and voltage

Исследуемая плата позволяет производить измерения тока утечки в пределах от 10 мкА до 1000 мкА, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции

повышенным выпрямленным напряжением от 50 В до 24000 В. Внедрение данного образца позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных микроамперметров, позволяющих производить измерение постоянного тока в высоковольтных испытательных установках для испытания изоляции объектов от 1 нФ до 200 нФ в диапазоне от 10 мкА до 1000 мкА [20-25].

Заключение

Среди существующих датчиков для измерения постоянного тока для резонансной испытательной установки был выбран прецизионный резистор типа C2-29B с изолирующим усилителем типа АМС1301 и с операционным усилителем типа AD8572ARZ, которые обладают следующими преимуществами: невысокая стоимость компонентов, гальваническая развязка и высокая надежность компонентов.

Применение разработанной схемы измерения выпрямленного тока утечки, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением, позволяет производить вычисление постоянной составляющей сигнала напряжения из переменного сигнала и в реальном масштабе времени, и, следовательно, оперативно контролировать ток в высоковольтных цепях для постоянного мониторинга.

Разработанная плата позволяет производить измерения тока утечки в пределах от 10 мкА до 1000 мкА, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением от 50 В до 24000 В. Внедрение данного образца позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных микроамперметров, позволяющих производить измерение тока в высоковольтных испытательных установках для испытания изоляции объектов с большой ёмкостью в диапазоне от 10 мкА до 1000 мкА.

Литература

1. Козлов В.К., Киржацких Е.Р. Автономный емкостной источник питания для устройств измерения параметров воздушной линии электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 3-4. С. 63.
2. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Калугин Ю.А., и др. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №3(40). С. 70-78.
3. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., и др. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 113-122.
4. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks; German version EN 50160:2010/A1:2015, 7 с. Available at: URL <https://www.en-standard.eu/din-en-50160-a3-merkmale-derspannung-in-offentlicherelektrizitatsversorgungsnetzen-deutsche-und-englische-fassung-en-50160-2010- pra3-2017/>. Accessed to 20.12.2018.
5. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Герасимов Д.О. Современные подходы к оценке качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 85-93.
6. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // I Междунар. науч.-техн. конф.: сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ. 2013. С. 209–215.
7. IEC 61000-2-2: Electromagnetic Compatibility (EMC); Pt 2-2: Enviroment – Conpatibility levels for low-frequency conducted disturbances and Signaling in public low-voltage power supple sistems. 2000. 29 p.]. Available at: URL <https://webstore.iec.ch/publication/4229>. Accessed to 20.12.2018.
8. Конесев, С.Г. Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., и др. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ. 2012. С. 178-183.
9. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки // Современные проблемы науки и образования. Электронный научный журнал. 2015. № 2. Режим доступа: www.science-education.ru/122-20794 – 07.08.2015.
10. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 41-47.
11. Конесев, С.Г., Мухаметшин А.В. Математическое моделирование резонансных режимов испытательной установки // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2015. № 3. С. 51-55.

12. Bandara K., Ekanayake C., Saha T., et al. Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments. *Energies*. 2016. V. N. 4. P. 258.
13. Patsch R. Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements, Theory and Practical Results. VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium.
14. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А. Исследование режимов работы дросселя резонансной испытательной установки // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2016. Т. 12. № 3.
15. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением Пат. 132213 РФ, МПК G01R. № 2013108529; заявл. 10.09.13. Бюл. №25.
16. Конесев Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А., и др. Установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением. Пат. 2662952 РФ, МПК G01R. № 2017130067; заявл. 24.08.17. Бюл. №22.
17. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №1(34). С. 49-55. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.
18. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // *Современная электроника*. 2004. №1. С.26-28.
19. Мухаметшин А.В., Мухаметшин Е.В. Установка для испытания средств защиты. Пат. 156457 РФ, МПК G01R. № 201524718; заявл. 23.06.15. Бюл. №31.
20. Shahmaev IZ, Gaisin BM, Shiryaev OV. A new method of taking management decisions at designing and developing electric power systems. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) pp. 1-3.
21. Mudiraj A.N. Improvement of Power Quality by mitigating harmonics in single phase AC distribution // 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT). 2016. P. 83-88.
22. Антонов А.И. Исследование уровня электромагнитных помех в сети 10/0,4 кВ с силовыми трансформаторами различной мощности при несимметричном характере нагрузки // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 65-76.
23. Rajasekhar A.N.V.V., Babu M.N. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC / 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016. P. 1754-1758.
24. Akdeniz E., Bagriyanik M. A knowledge-based decision support algorithm to reduce the impact of transmission system vulnerabilities. *International Journal of Electric Power and Energy Systems*. 2016. V. 78. pp. 436-444.

Авторы публикации

Хазиева Регина Тагировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехники и электрооборудования предприятий» (ЭЭП), Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ).

Мухаметшин Андрей Валерьевич – инженер кафедры «Электротехники и электрооборудования предприятий» (ЭЭП), Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ).

References

1. Kozlov VK, Kirzhatskikh ER. Autonomous capacitive power supply for devices for measuring parameters of overhead power transmission lines. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy problems*. 2017;19;3-4;63.
2. Mugalimov RG, Mugalimova AR., Kalugin YuA et al. Methodology for diagnostics and identification of malfunctions of windings of an induction motor in the mode of its operation. *Electrotechnical systems and complexes*. 2018;3(40);70-78.
3. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Experimental and analytical identification of the mathematical model of an electromechanical DC converter using the least squares method. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy problems*. 2019;21;4.113-122.
4. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks; German version EN 50160:2010/A1:2015, 7 c. Available at: URL <https://www.en-standard.eu/din-en-50160-a3-merkmale-derspannung-in-offentlicherelektrizitatsversorgungsnetzen-deutsche-und-englische-fassung-en-50160-2010-pra3-2017/>. Accessed to 20.12.2018

5. Suslov KV, Solonina NN, Gerasimov DO. Modern approaches to assessing the quality of electrical energy. Proceedings of Higher Educational Institutions. *Energy problems*. 2017;19;7-8;85-93.
6. Konesev SG, Mukhametshin AV, Kirillov RV. *The choice of the VIA circuit for operation in the resonant mode*. I Intern. scientific and technical Conf. : Sat. scientific. tr. Ufa: USPTU. 2013;209-215.
7. IEC 61000-2-2: Electromagnetic Compatibility (EMC); Pt 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and Signaling in public low-voltage power supply systems. 2000. 29 p.]. Available at: URL <https://webstore.iec.ch/publication/4229>. Accessed to 20.12.2018.
8. Konesev SG, Mukhametshin AV, Khazieva RT, Strizhev DA. New circuit solutions of the resonant high-voltage test facility. *Innovative directions of development of electric drive, electrical technologies and electrical equipment: interuniversity*. Sat. scientific. tr. Ufa: USPTU. 2012;178-183.
9. Konesev SG, Mukhametshin AV. Assessment of the influence of insulation parameters of high-voltage equipment on the operating modes of the test facility. Modern problems of science and education. *Electronic scientific journal*. 2015;2. Access mode: www.science-education.ru/122-20794 - 07.08.2015.
10. Mukhametova LR, Akhmetova IG, Strielkovski V. Innovations in the field of energy storage. Proceedings of Higher Educational Institutions. *Energy problems*. 2019;21;4;41-47.
11. Konesev SG, Mukhametshin AV. Mathematical modeling of resonance modes of the test setup. *News of higher educational institutions of the Chernozen region*. 2015;3;51-55.
12. Bandara K, Ekanayake C, Saha T, and Ma H. Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments. *Energies*. 2016;4;258.
13. Patsch R. *Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements, Theory and Practical Results*. VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium.
14. Konesev SG, Mukhametshin AV, Konev AA. Investigation of the operating modes of the resonant test facility choke. *Electrical and information complexes and systems*. 2016;12;3.
15. Konesev SG, Mukhametshin AV. *Compact test setup for testing insulation of electrical equipment with increased voltage*. Pat. 132213 RF, IPC G01R. No. 2013108529; declared 10.09.13. Bul.25.
16. Konesev SG, Mukhametshin AV, Konev AA, Gainutdinov IZ. *Installation for testing insulation of electrical equipment with increased voltage*. Pat. 2662952 RF, IPC G01R. No. 2017130067; declared 08.24.17. Bul.22.
17. Konesev SG, Khazieva RT. Analysis of the stabilization properties of inductive-capacitive converters for various methods of connecting hybrid electromagnetic elements. *Electrotechnical systems and complexes*. 2017;1 (34):49-55. doi: 10.18503 / 2311-8318-2017-1 (34)49-55.
18. Danilov A. Modern industrial current sensors. *Modern electronics*, 2004;1;26-28.
19. Mukhametshin AV, Mukhametshin EV. *Installation for testing protection means*. Pat. 156457 RF, IPC G01R. No. 201524718; declared 06/23/15. Bul. No. 31.
20. Shamaev IZ, Gaisin BM, Shiryayev OV. *A new method of taking management decisions at designing and developing electric power systems*. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM);1-3.
21. Mudiraj AN. *Improvement of Power Quality by mitigating harmonics in single phase AC distribution*. 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT). 2016;83 – 88.
22. Antonov AI. Investigation of the level of electromagnetic interference in a 10 / 0.4 kV network with power transformers of various capacities with an asymmetrical nature of the load. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy problems*. 2017;19;9-10;65-76.
23. Rajasekhar A.N.V.V, Babu M.N. *Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC*. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016;1754-1758.
24. Akdeniz E, Bagriyanik M. A knowledge-based decision support algorithm to reduce the impact of transmission system vulnerabilities. *International Journal of Electric Power and Energy Systems*. 2016;78:436-444.

Authors of the publication

Regina T. Khazieva – Ufa State Petroleum Technological University (USPTU).

Andrey V. Mukhametshin – Ufa State Petroleum Technical University (USPTU).

Получено

23 июля 2021г.

Отредактировано

16 августа 2021г.

Принято

30 августа 2021г.