**Борис Анатольевич
Мартынов
Boris A. Martynov**

*инженер
научно-исследовательской
лаборатории,
ООО НИЦ
«Энергодиагностика»,
Уфа, Россия*

**Регина Тагировна
Хазиева
Regina T. Khazieva**

*кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Электротехника
и электрооборудование
предприятий»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*

**Андрей Валерьевич
Мухаметшин
Andrey V. Mukhametshin**

*инженер кафедры
«Электротехника
и электрооборудование
предприятий», Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*

УДК 621.317.311, 621.396.669

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-26-40

ЗАЩИТА СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА РЕЗОНАНСНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Цель исследования

При разработке источников испытательного напряжения на переменном токе для оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования стоит задача защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при пробоях изоляции и полных разрядах.

Методы исследования

При решении поставленной задачи авторами предложено техническое решение защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, в котором используются быстродействующие диоды Шоттки.

Результаты

В статье в ходе исследования стенда защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, создан опытно-промышленный образец, позволяющий защитить схему измерения испытательного тока при пробоях изоляции и полных разрядах. Применение разработанной защиты схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, позволяет ограничить высоко-частотные импульсы амплитудой больше 405 мВ.

Таким образом, внедрение данной схемы позволит на ее базе создавать ряд защитных устройств, позволяющих защитить схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным

напряжением промышленной частоты от 1 до 6 кВ. Полученные результаты могут быть использованы в технике высоких напряжений для исследования защиты схем измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты.

Ключевые слова: пробой, испытание изоляции, испытательный ток, диоды, повышенное напряжение, высоковольтная испытательная установка, испытуемый объект, резонанс

PROTECTION OF THE CURRENT MEASURING CIRCUIT OF A RESONANCE TESTING INSTALLATION

Aims of research

When developing alternating current test voltage sources for assessing the insulation quality of high-voltage electrical equipment, the task is to protect the test current measurement circuit flowing through the tested object.

Research methods

When solving the problem, the authors proposed a technical solution to protect the circuit for measuring the test current flowing through the test object when testing insulation with increased voltage of industrial frequency, in which high-speed Schottky diodes are used.

Results

In the article, in the course of researching the protection stand of the test current measurement circuit flowing through the tested object when testing the insulation with increased power frequency voltage, a prototype was created that allows to protect the test current measurement circuit. The use of the developed protection circuit for measuring the test current flowing through the test object when testing the insulation with an increased voltage of industrial frequency makes it possible to limit high-frequency pulses with an amplitude of more than 405 mV.

Thus, the introduction of this circuit will make it possible, on its basis, to create a number of protective devices that make it possible to protect the circuits for measuring the test current flowing through the tested object when testing the insulation with an increased voltage of industrial frequency from 1 to 16 kV. The results obtained can be used in high voltage technology to investigate the protection of circuits for measuring the test current flowing through the test object when testing the insulation with an increased power frequency voltage.

Keywords: insulation test, test current, diodes, overvoltage, high voltage test set, test object, resonance

Введение и литературный обзор

Одним из основных методов оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования согласно ГОСТ Р 55194-2012, ПУЭ, ПТЭЭП и СТО 34.01-23.1-001-2017 является испытание переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты 50 Гц [1]. Данный метод испытания позволяет на ранней стадии выявить дефекты в изоляции высоковольтного электрооборудования. Для испытания переменным синусоидальным напряжением промышленной

частоты 50 Гц, которое прикладывается к изоляции, применяются специальные специализированные установки различных фирм изготовителей [2–9]. Все существующие высоковольтные испытательные установки, предназначенные для испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты 50 Гц, состоят из трёх основных блоков (частей):

1. *высоковольтный блок*, в состав которого входят основные элементы, такие как высоковольтный испытательный

трансформатор, высоковольтный испытательный кабель и современные высоковольтные разъемы;

2. *блок управления*, в состав которого входят основные элементы, такие как плата управления на базе микроконтроллера, источники стабилизированного питания, быстродействующие реле и т.д.;

3. *блок измерения*, в состав которого входят основные элементы, такие как плата измерения тока и напряжения на современных микросхемах, высокоомные и емкостные высоковольтные делители напряжения, прецизионные резисторы, датчики тока и т.д.

В процессе многочисленных испытаний на переменном токе промышленной частоты возникают «ненормальные» режимы, такие как пробой изоляции испытуемого объекта, непродолжительные неполные разряды, при которых испытуемый объект шунтируется искровым разрядом, обрыв высоковольтного кабеля под напряжением или замыкание его на заземлённые элементы, обрыв точки низкого потенциала испытательного трансформатора. Все описанные «ненормальные» режимы работы могут повлиять и вывести из строя один из трех блоков испытательной установки, такие как схемы измерения тока и напряжения, схемы индикации, схемы управления высоковольтными установками в процессе испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты [10]. Основной задачей данной статьи является *разработка и исследование схемы защиты при непродолжительном полном разряде на заземляющий контур (элемент с нулевым потенциалом) в процессе испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты.*

Материалы и методы

Согласно ГОСТ 1516.2-97 «Электрооборудование и электроустановки пере-

менного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции» вводятся следующие определения:

1) *полный разряд* — электрический разряд, полностью шунтирующий изоляцию между электродами и вызывающий снижение значения напряжения между электродами практически до нуля;

2) *пробой* — полный разряд в твердом диэлектрике.

Для исследования пробоя и моделирования процесса полного пробоя (разряда) использовались следующие приборы и компоненты, предоставленные ООО НИЦ «Энергодиагностика» (г. Уфа) (рисунок 1).

1 — сеть, 220 В, 50 Гц; 2 — высоковольтная испытательная установка; 3 — схема измерения испытательного переменного тока промышленной частоты; 4 — осциллограф; 5 — испытуемый объект (высоковольтная изоляция); 6 — регулируемый шаровой разрядник

1 — power source, 220 V, 50 Hz; 2 — high voltage test facility; 3 — circuit for measuring test alternating current of industrial frequency; 4 — oscilloscope; 5 — test object (high voltage insulation); 6 — adjustable spherical gap

Рисунок 1. Схема воссоздания процесса непродолжительного полного пробоя (разряда)

Figure 1. Scheme of recreation of the process of short complete breakdown (discharge)

В современных приборах для защиты микросхем от электростатического разряда применяют схемы защиты на основе стабилитронов, резисторов, быстродей-

ствующих диодов, специализированные защитные диоды, буферные микросхемы и т.д. [11–20].

Для исследования защиты схемы измерения переменного испытательного тока используются диоды Шоттки. Преимущества диодов Шоттки заключаются в том, что они имеют меньшую электрическую ёмкость перехода, что обуславливает быстроедействие, они обладают высокой надёжностью и низкой стоимостью.

В качестве источника испытательного напряжения промышленной частоты используется резонансная испытательная установка РИУ-10-М2 (рисунок 2) производства ООО НИЦ «Энергодиагностика». На рисунке 2 шаровой разрядник 4 используется для регулирования напряжения пробоя на испытуемом объекте, прецизионный резистор 5 типа С2-29В отечественного производителя АНО «НПО» «ЭРКОН» применяется для измерения испытательного тока, диоды Шоттки типа MBR0520L 6, 7 в корпусе

DO-41 производства ST Microelectronics используются для защиты схемы измерения при имитации непродолжительных полных пробоев.

Прецизионные резисторы 11, 12 типа С2-33Н, представленные на рисунке 2, применяются для задания коэффициента усиления схемы; 8, 11 применяются для уравнивания токов входных каскадов; 9, 10 — делитель для создания напряжения смещения для нормальной работы операционного усилителя в режиме однополярного питания. Операционный усилитель 13 (рисунок 2) типа MCP6002 в корпусе SOIC-8 производителя Microchip Technology применяется для усиления входного сигнала. Осциллограф 14 (рисунок 2) типа АТАКОМ ADS-2061mv применяется для регистрации осциллограмм.

Фотоизображение экспериментального стенда для исследования процесса непродолжительного полного пробоя представлено на рисунке 3, а и б.

1 — сеть, 220 В, 50 Гц; 2 — высоковольтная испытательная установка; 3 — испытуемый объект (ёмкостной стенд); 4 — шаровой разрядник; 5, 8, 9, 10, 11, 12 — прецизионные резисторы; 6, 7 — диоды Шоттки; 13 — операционный усилитель; 14 — осциллограф

1 — power source, 220 V, 50 Hz; 2 — high voltage test facility; 3 — test object (capacitive stand); 4 — ball spark gap; 5, 8, 9, 10, 11, 12 — precision resistors; 6, 7 — Schottky diodes; 13 — operational amplifier; 14 — oscilloscope

Рисунок 2. Схема исследования процесса непродолжительного полного пробоя

Figure 2. Scheme of research of a short-term process complete breakdown

a)

1, 2, 3, 4, 5, 6 — прецизионные резисторы;
7, 8 — диоды Шоттки;
9 — операционный усилитель

1, 2, 3, 4, 5, 6 — precision resistors;
7, 8 — Schottky diodes;
9 — operational amplifier

b)

1 — осциллограф;
2 — шаровой разрядник;
3 — испытуемый объект

1 — oscilloscope;
2 — ball spark gap;
3 — test object

Рисунок 3. Фотоизображение экспериментального стенда для исследования процесса непродолжительного полного пробоя

Figure 3. Experimental stand photograph for investigating the process of short-term complete breakdown

Рассмотрим режимы работы № 1 и № 2 без непродолжительного полного пробоя.

Режим работы № 1

Напряжение от источника питания 1 подается на вход резонансной испытательной установки 2 (рисунок 2). На выходе резонансной испытательной установки 2 генерируется и подаётся высоковольтное испытательное напряжение промышленной частоты на испытуемый объект 3.

Шаровой разрядник 4 (рисунок 2) не участвует в схеме, т.к. рассматриваемый режим без непродолжительного полного пробоя. Под действием ёмкостной нагрузки 3 ёмкостью, равной 145 нФ, при испытательном напряжении 3 кВ протекает испытательный ток 135 мА по прецизионному резистору 5. На входе и выходе операционного усилителя 13 типа

МСР6002 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 4, а.

Из рисунка 4, а видно, что при испытательном напряжении промышленной частоты 3 кВ на прецизионном резисторе 5 (рисунок 2) падает напряжение и подаётся на вход операционного усилителя 13, где происходит усиление в 2,8 раза и регистрация осциллограмм осциллографом 14.

Режим работы № 2

Под действием ёмкостной нагрузки 3 при испытательном напряжении 6 кВ протекает испытательный ток 321 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений на входе и выходе операционного усилителя типа МСР6002,

1 — 200 mV/div, 5Ks/s;
2 — 200 mV/div; 5Ks/s

1 — осциллограмма напряжения на входе
операционного усилителя;
2 — осциллограмма напряжения
на выходе операционного усилителя

1 — oscillogram of the voltage at the input
of the operational amplifier;
2 — oscillogram of the voltage
at the output of the operational amplifier

a) режим работы № 1 без непродолжительного полного пробоя
b) режим работы № 2 без непродолжительного полного пробоя

a) operating mode No. 1 without short complete breakdown
b) operating mode No. 2 without short complete breakdown

1 — 500 mV/div, 5Ks/s;
2 — 500 mV/div; 5Ks/s

1 — осциллограмма напряжения на входе
операционного усилителя;
2 — осциллограмма напряжения на выходе
операционного усилителя

1 — oscillogram of the voltage at the input
of the operational amplifier;
2 — oscillogram of the voltage
at the output of the operational amplifier

Рисунок 4. Осциллограммы напряжений на входе и выходе операционного усилителя

Figure 4. Oscillograms of voltages at the input and output of the operational amplifier

представленные на рисунке 4, б. Из осциллограммы напряжения 2 видно, что при амплитудном напряжении больше 405 мВ происходит ограничение (скругление) осциллограммы, защитные диоды Шоттки MBR0520L переходят в проводящий режим, и выходное напряжение ограничивается на уровне 405 мВ при температуре 27,5 °С.

Рассмотрим режим работы при непродолжительном полном пробое 1 кВ, 2 кВ, 4 кВ и 6 кВ.

Напряжение от источника питания 1 подается на вход резонансной испытательной установки 2 (рисунок 2). На выходе резонансной испытательной установки 2 генерируется и подаётся высоковольтное испытательное напряжение от 1 до 6 кВ на испытуемый объект ёмкостью 145 нФ. На каждом уровне напряжения в

шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты регулируем зазор (расстояние) между шаровыми разрядниками.

В определенный момент регулирования расстояния между шаровыми разрядниками происходит непродолжительный полный разряд на точку низкого потенциала. Рассмотрим данные режимы подробнее.

Режим работы № 3

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 1 кВ протекает испытательный ток 75 мА через прецизионной резистор 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 4, а.

В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 1 кВ регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 5, *b*.

Из рисунка 5, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 1 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частотой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе, регистрируемая осциллографом до 325 Гц. Всплеск импульсов регистрируемым осциллографом не наблюдается. Защита операционного усилителя при испытаниях на перемен-

ном токе промышленной частоты до 1 кВ не требуется.

Режим работы № 4

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 2 кВ протекает испытательный ток 191 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 6, *a*. В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 2 кВ регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 6, *b*.

1 — 200 mV/div, 5 Ks/s;

2 — 200 mV/div, 5 Ks/s

a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;

b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 1 кВ

a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;

b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 1 kV

Рисунок 5. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 3)

Figure 5. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 3)

1 — 100 mV/div, 5Ks/s;
2 — 100 mV/div, 5Ks/s

1 — 100 mV/div, 5Ks/s;
2 — 100 mV/div, 5Ks/s

- a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;
b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 2 кВ
- a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;
b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 2 kV

Рисунок 6. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 4)

Figure 6. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 4)

Из рисунка 6, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 2 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом до 527 Гц всплеском импульсов амплитудой больше 450 мВ.

При многократных повторениях имитации непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом амплитуда изменяется в пределах 8 %, а наложенная частота всплеска импульсов — в пределах 12 %. Защита операционного усилителя при испытаниях на переменном токе промышленной частоты на 2 кВ требуется.

Режим работы № 5

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 4 кВ протекает испытательный ток 241 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 7, *a*.

В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 4000 В регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 7, *b*.

1 — 100 mV/div, 5Ks/s;
2 — 100 mV/div, 5Ks/s

a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;

b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 4 кВ

a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;

b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 4 kV

Рисунок 7. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 5)

Figure 7. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 5)

Из рисунка 7, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 4 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частотой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе, регистрируемая осциллографом до 3,341 кГц, всплеском импульсов амплитудой больше 500 мВ.

При многократных повторениях имитации непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом амплитуда изменяется в пределах 11 %, а наложенная частота всплеска импульсов — в пределах 17 %. Защита операционного усилителя при испытаниях на переменном токе промышленной частоты на 4 кВ требуется.

Режим работы № 6

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 6 кВ протекает испытательный ток 312 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2). На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 8, *a*. В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 6000 В регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя на точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 8, *b*.

1 — 500 mV/div, 5Ks/s;
2 — 500 mV/div, 5Ks/s

1 — 500 mV/div, 5Ks/s;
2 — 500 mV/div, 5Ks/s

a) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя без непродолжительного полного пробоя;

b) осциллограмма напряжения на входе операционного усилителя в момент непродолжительного полного пробоя 6 кВ

a) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier without a short complete breakdown;

b) oscillogram of the voltage at the input of the operational amplifier at the moment of a short complete breakdown of 6 kV

Рисунок 8. Осциллограммы напряжений на входе операционного усилителя (режим № 6)

Figure 8. Oscillograms of voltages at the input of the operational amplifier (mode No. 6)

Из рисунка 8, *b* видно, что при имитации пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 6 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом до 4,2641 кГц всплеском импульсов амплитудой больше 850 мВ.

При многократных повторениях имитации непродолжительного разряда в точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом амплитуда изменяется в пределах 16 %, а наложенная частота всплеска импульсов — в пределах 21 %. Защита операционного усилителя при испытаниях на переменном токе промышленной частоты на 6 кВ требуется.

Результаты экспериментов по режимам 1–6 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Table 1. Experimental results

Режим работы	1	2	3	4	5	6
Ёмкость нагрузки, нФ	145	145	145	145	145	145
Испытательное напряжение, кВ	3	6	1	2	4	6
Испытательный ток, мА	135	321	75	191	241	312
Частота наложенного сигнала, Гц	50	50	325	527	3341	4641
Амплитуда импульсов, мВ	—	—	95	450	500	850

Режим работы № 7

Под действием ёмкостной нагрузки 3, равной 145 нФ, при испытательном напряжении промышленной частоты 6 кВ протекает испытательный ток 312 мА по прецизионному резистору 5 (рисунок 2).

На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений, представленные на рисунке 9. В шаровом разряднике 4 при подаче испытательного напряжения промышленной частоты 6 кВ регулируем зазор (расстояние) между разрядниками, до непродолжительного полного пробоя в точку низкого потенциала. На выходе операционного усилителя 13 регистрируем осциллографом 14 осциллограммы напряжений при непродолжительном полном пробое, представленные на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что при имитации непродолжительного пробоя шаровым разрядником при напряжении промышленной частоты 6 кВ происходит наложение двух частот: одна связана с частотой испытательного напряжения (тока) 50 Гц, а другая форма тока непродолжительного

разряда на точку низкого потенциала на прецизионном резисторе регистрируемая осциллографом до 4,104 кГц всплеском импульсов амплитудой не больше 405 мВ. Защитные диоды Шоттки ограничивают и защищают от высокочастотных импульсов больше 405 мВ.

Согласно полученным экспериментальным данным, представленным в таблице 1, при непродолжительных полных пробоях в процессе испытания изоляции высоковольтного электрооборудования на переменном токе промышленной частоты внедрена защита схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект в ряд испытательных установок РИУ.

На рисунке 10 представлены две платы. Плата № 1 (рисунок 10, а) — это плата управления РИУ на базе маломощного микроконтроллера типа STM32L476VGT6 Cortex-M4, 80 МГц производства фирмы ST Microelectronics. Плата № 2 (рисунок 10, б) — это плата измерения переменного тока и напряжения с защитой изолирующих усилителей диодами Шоттки.

Рисунок 9. Осциллограмма напряжений на входе операционного усилителя при непродолжительном полном пробое 6 кВ (режим № 7) со схемой защиты на диодах Шоттки

Figure 9. Oscillogram of voltages at the input of the operational amplifier with a short full breakdown of 6 kV (mode No. 7) with a protection circuit based on Schottky diodes

a)

b)

a) плата управления РИУ; b) плата измерения тока и напряжения

a) control board RIU; b) current and voltage measurement board

Рисунок 10. Платы управления и измерения

Figure 10. Control and measurement boards

Выводы

Среди существующих методов защиты схемы испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при пробоях изоляции и полных разрядов, были выбраны быстродействующие диоды Шоттки, которые обладают следующими преимуществами: имеют меньшую электрическую ёмкость перехода, невысокую стоимость компонентов и высокую надежность компонентов.

Применение предложенного решения для схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, позволяет защитить изолирующие усилители от высокочастотных импульсов.

Разработанная плата позволяет производить защиту схемы измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции

повышенным напряжением промышленной частоты от 1 до 6 кВ от непродолжительного полного пробоя.

Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022-2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

Список источников

1. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // Сб. науч. тр. I Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2013. С. 209-215.

2. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и

электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 178-183.

3. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 2. www.science-education.ru/122-20794 — 07.08.2015.

4. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Математическое моделирование резонансных режимов испытательной установки // Вести высших учебных заведений Черноморья. 2015. № 3. С. 51-55.

5. 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. С. 5-10.

6. Пат. 132213 РФ, МПК G 01 R. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин. № 2013108529; заявл. 10.09.13. Бюл. № 25.

7. Пат. 2662952 РФ, МПК G 01 R. Установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин, А.А. Конев, И.З. Гайнутдинов. № 2017130067; заявл. 24.08.17. Бюл. № 22.

8. 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.

9. Пат. 156457 РФ, МПК G 01 R. Установка для испытания средств защиты / А.В. Мухаметшин, Е.В. Мухаметшин. № 201524718; заявл. 23.06.15. Бюл. № 31.

10. Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Горшенин А.И. Исследование и разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. № 4, Т. 16. С. 46-55.

11. Christian L.A. Accurate High Direct Current Measurements for Industry // 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). doi: 10.1109/CPEM.2018.8500933.

12. Gert Rietveld, Jan H.N. van der Beek, Ernest Houtzager. Accurate DC Current Ratio Measurements for Primary Currents up to 600 A // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2015. Vol. 64. Issue 11. doi: 10.1109/TIM.2015.2434096.

13. Kuerten Ihlenfeld W.G., Vasconcellos R.T.B. Current Divider Based Impedance Comparator // Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8501083.

14. Zhou Liren, Pan Yang, Zhu Li. Sensitivity and Drift Value Measurement of DC Current Comparator // 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). 2019. doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101759.

15. Charles J. Burroughs, Alain Rüfenacht, Stefan Cular, Paul D. Dresselhaus. Automated Leakage Current Measurement Capability for Programmable Josephson Voltage Standards // Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). 2020. doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191831.

16. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Ge Gao, Zhiquan Song, Liuwei Xu, Shiyang He, Xiuqing Zhang. Overview of CASHIPS High-Power Electrical Equipment Test Facility // IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC). 2018. doi: 10.1109/SPEC.2018.8635843.

17. Yuan Sun, Yanfei Ru, Xuefeng He, Chen Dong. Research on Testing System and Test Method for Charging Facilities of Electric Vehicles // 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS). 2018. doi: 10.1109/CCIS.2018.8691342.

18. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Xiuqing Zhang, Ge Gao, Liuwei Xu, Shiyang He. High Power Test Facility 500 kA Pulse Current Sharing Control // IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). 2018. doi: 10.1109/PEAC.2018.8590464.

19. Du Q., Liu C., Ding K., Lu K., Long Y., Liu C., Han Q., Wang J., Song Y., Niu E., Bauer P. Test Facility and Results of ITER PF4 Current Leads // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 48. Issue 6. doi: 10.1109/TPS.2019.2963082.

20. Albani M., Puggelli F., Toccafondi A., Meniconi G., Scortecci F. Development and Application of Iterative PO to the Characterization of EMI/EMC Ground Test Facility for Electric Propulsion Thrusters // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2018. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608573.

References

1. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Kirillov R.V. Vybor skhemy VIU dlya raboty v rezonansnom rezhime [The Choice of the VIA Circuit for Operation in the Resonant Mode]. *Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Collection of Scientific Works of I International Scientific and Technical Conference]. Ufa, UGNTU, 2013, pp. 209-215. [in Russian].

2. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Khazieva R.T., Strizhev D.A. Novye skhemotekhnicheskie resheniya rezonansnoi vysokovol'tnoi ispytatel'noi ustanovki [New Circuit Solutions of The Resonant High-Voltage Test Facility]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Innovatsionnye napravleniya razvitiya elektroprivoda, elektrotekhnologii i elektrooborudovaniya»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Innovative Directions of Development of Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment»]. Ufa, UGNTU, 2012, pp. 178-183. [in Russian].

3. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Otsenka vliyaniya parametrov izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya na rezhimy raboty ispytatel'noi ustanovki [Assessment of the Influence of Insulation Parameters of High-Voltage Equipment on the Operating Modes of the Test Facility]. *Elektronnyi*

nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education», 2015, No. 2. www.science-education.ru/122-20794 — 07.08.2015. [in Russian].

4. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Matematicheskoe modelirovanie rezonansnykh rezhimov ispytatel'noi ustanovki [Mathematical Modeling of Resonance Modes of the Test Setup]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya — News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2015, No. 3, pp. 51-55. [in Russian].

5. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A. Issledovanie rezhimov raboty drosselya rezonansnoi ispytatel'noi ustanovki [Modelling Modes Inductor Resonance Test Set]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2016, Vol. 12, No. 3, pp. 5-10. [in Russian].

6. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Kompaktnaya ispytatel'naya ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem [Compact Test Setup for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent 132213 RF, 2013. [in Russian].

7. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A., Gainutdinov I.Z. Ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem [Installation for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent 2662952 RF, 2017. [in Russian].

8. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analiz stabilizatsionnykh svoystv induktivno-emkostnykh preobrazovatelei pri razlichnykh sposobakh podklyucheniya gibridnykh elektromagnitnykh elementov [Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i*

sistemy — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, No. 1 (34), pp. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55. [in Russian].

9. Mukhametshin A.V., Mukhametshin E.V. *Ustanovka dlya ispytaniya sredstv zashchity* [Installation for Testing Protection Means]. Patent 156457 RF, 2015. [in Russian].

10. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V., Gorshenin A.I. Issledovanie i razrabotka skhemy izmereniya peremennogo toka pri ispytanii izolyatsii [Research and Development of the Accurate Measurement Scheme for Insulation Tests]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, No. 4, Vol. 16, pp. 46-55. [in Russian].

11. Christian L.A. Accurate High Direct Current Measurements for Industry. *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*. doi: 10.1109/CPEM.2018.8500933.

12. Gert Rietveld, Jan H.N. van der Beek, Ernest Houtzager. Accurate DC Current Ratio Measurements for Primary Currents up to 600 A. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, Vol. 64, Issue 11. doi: 10.1109/TIM.2015.2434096.

13. Kuerten Ihlenfeld W.G., Vasconcellos R.T.B. Current Divider Based Impedance Comparator. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8501083.

14. Zhou Liren, Pan Yang, Zhu Li. Sensitivity and Drift Value Measurement of DC Current Comparator. *14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*. 2019. doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101759.

15. Charles J. Burroughs, Alain Rüfenacht, Stefan Cular, Paul D. Dresselhaus.

Automated Leakage Current Measurement Capability for Programmable Josephson Voltage Standards. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*. 2020. doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191831.

16. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Ge Gao, Zhiquan Song, Liuwei Xu, Shiyang He, Xiuqing Zhang. Overview of CASHIPS High-Power Electrical Equipment Test Facility. *IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. 2018. doi: 10.1109/SPEC.2018.8635843.

17. Yuan Sun, Yanfei Ru, Xuefeng He, Chen Dong. Research on Testing System and Test Method for Charging Facilities of Electric Vehicles. *5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*. 2018. doi: 10.1109/CCIS.2018.8691342.

18. Xiaojiao Chen, Liansheng Huang, Peng Fu, Xiuqing Zhang, Ge Gao, Liuwei Xu, Shiyang He. High Power Test Facility 500 kA Pulse Current Sharing Control. *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. 2018. doi: 10.1109/PEAC.2018.8590464.

19. Du Q., Liu C., Ding K., Lu K., Long Y., Liu C., Han Q., Wang J., Song Y., Niu E., Bauer P. Test Facility and Results of ITER PF4 Current Leads. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2019. Vol. 48. Issue 6. doi: 10.1109/TPS.2019.2963082.

20. Albani M., Puggelli F., Toccafondi A., Meniconi G., Scortecci F. Development and Application of Iterative PO to the Characterization of EMI/EMC Ground Test Facility for Electric Propulsion Thrusters. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. 2018. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608573.