Александр Владимирович Белов
Alexandr V. Belov

*инженер по метрологии отдела
поверки средств измерений
электромагнитных величин,
ФБУ «Государственный
региональный центр стандартизации,
метрологии и испытаний
Республики Башкортостан»,
Уфа, Россия*

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: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-55-66

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА РЕЗОНАНСНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Актуальность

При разработке источников испытательного напряжения на переменном токе для оценки качества изоляции высоковольтного электрооборудования стоит задача определения нормированных точностных характеристик и их соответствия требованиям нормативно-технической документации.

Цель исследования

Разработать и исследовать методику калибровки с основной приведенной погрешностью измерения испытательного тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, не превышающей $\pm 5\%$.

Методы исследования

При решении поставленной задачи авторами предложено рассчитать и исследовать линейную, экспоненциальную и степенную функции, описывающие связь между экспериментальными данными снятия уровней квантования с аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера от тока на образцовом амперметре, используя программные модули, выполняющие обработку измерительной информации.

Результаты

В статье в ходе исследования рассчитана и выбрана наиболее оптимальная функция, описывающая связь между экспериментальными данными снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре, создан опытно-промышленный образец, позволяющий производить измерения испытательного тока в пределах приведенной погрешности $0,17\%$. Применение разработанной методики калибровки с основной приведенной погрешностью в заданных пределах позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных амперметров, позволяющих производить измерение переменного тока в диапазоне от 1 мА до 100 А . Полученные результаты могут быть использованы в технике высокого напряжения для исследования схем измерения тока, протекающего через испытуемый объект при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты.

Ключевые слова: аттестация, измерение тока, испытание изоляции, испытательный ток, повышенное напряжение, высоковольтная испытательная установка, испытуемый объект, резонанс

CALIBRATION TECHNIQUE FOR A RESONANT AC TEST INSTALLATION

Relevance

When developing alternating current test voltage sources to assess the quality of insulation of high-voltage electrical equipment, the task is to determine the standardized accuracy characteristics, and their compliance with the requirements of regulatory and technical documentation.

Aim of research

Develop and investigate a calibration technique with the basic reduced measurement error of the test current flowing through the test object when testing insulation with an increased power frequency voltage not exceeding $\pm 5\%$.

Research methods

When solving the problem, the authors proposed to calculate and investigate the linear, exponential and power-law functions describing the relationship between the experimental data of removing the quantization levels from the ADC of the microcontroller from the current on the exemplary ammeter using software modules that process the measurement information.

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. In the article, during the study, the most optimal function was calculated and selected. This function describes the relationship between the experimental data of removing the quantization levels from the ADC of the microcontroller and the current on the exemplary ammeter. The authors have created a prototype that allows you to measure the test current with a reduced error of 0.17 %. The use of the developed calibration technique with the basic reduced error within the specified limits will make it possible to create a number of digital measuring ammeters on its basis, which make it possible to measure alternating current in the range from 1 mA to 100 A. The results obtained can be used in high voltage technology to study current measurement circuits, flowing through the test object when testing the insulation with an alternating sinusoidal voltage of power frequency.

Keywords: certification, current measurement, insulation test, test current, overvoltage, high voltage test setup, test object, resonance

Согласно ГОСТ Р 8.568-2017 ГСИ «Аттестация испытательного оборудования» вводится следующее определение: аттестация испытательного оборудования — определение нормированных точностных характеристик испытательного оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к эксплуатации. Основные измеряемые параметры при испытании повышенным переменным синусоидальном напряжении промышленной частоты, которые подлежат контролю, — это испытательное напряжение и ток, протекающий через испытуемый объект. В данной статье рассматривается поиск оптимальной эмпирической функции при первичной аттестации высоковольтной испытательной установки, описывающей связь между экспериментальными данными снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре.

На рисунке 1 представлена схема снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при нагрузке ёмкостного объекта 105 нФ.

- 1 — регулятор напряжения от 0 до 220 В, 50 Гц; 2 — резонансный контур;
3 — повышающий высокопотенциальный испытательный трансформатор;
4 — образцовый амперметр;
5 — токоограничивающий резистор;
6 — прецизионный резистор;
7 — ёмкостной стенд; 8 — изолирующий усилитель; 9 — АЦП контроллера

- 1 — voltage regulator from 0 to 220 V, 50 Hz;
2 — resonant circuit; 3 — step-up high-potential test transformer; 4 — exemplary ammeter; 5 — current-limiting resistor;
6 — precision resistor; 7 — capacitive stand;
8 — isolating amplifier; 9 — ADC controller

Рисунок 1. Схема проведения эксперимента

Figure 1. Scheme of the experiment

На рисунке 1 даны следующие обозначения. В качестве регулятора напряжения используется лабораторный автотранс-

форматор 1 типа TDGC2-2 фирмы «Ресанта». Резонансный контур 2 состоит из набора емкостных и индуктивных элементов, рассчитанных на резонансную частоту 50 Гц. Высокопотенциальный повышающий испытательный трансформатора 3 типа ВИТ-РИУ-10 зав.№02-35.2021. Амперметр 5 типа Э59 используется в качестве измерений среднеквадратических значений тока с классом точности 0,5. Токоограничивающий постоянный проволочный резистор 6 типа С5-35В-160 номинальным сопротивлением 2,5 кОм. Прецизионный резистор 7 типа С2-29В отечественного производителя АНО «НПО «ЭРКОН»» применяется для измерения испытательного тока. Стенд электрических емкостей 8 от 0 до 210 нФ напряжение до 30 кВ производства компании ООО НИЦ «Резонансные системы».

Экспериментальные данные, представленные в таблице 1, получены при температуре окружающего воздуха 20,5 °С, относительной влажности воздуха 52 %, электрическом напряжении питающей сети 220,2 В, частоте питающей сети 50 Гц.

В таблице 1 параметр δ определяется по следующему выражению:

$$\delta = \frac{I_i}{m_i}, \quad (1)$$

где I_i — измеренное среднеквадратическое значение тока на образцовом амперметре, мА;

m_i — количество уровней квантования на АЦП.

На основе таблицы 1 поставлена задача — определить функцию, приближённо описывающую зависимость между экспе-

риментальными данными таблицы, но в пределах не больше основной приведенной погрешности $\pm 5 \%$. При этом отклонение значений в точках, вычисленных по полученной формуле, от экспериментальных данных должно быть минимальным. Для решения поставленной задачи, а именно получения аппроксимирующей функции по табличным данным с наиболее точным приближением, исследуем линейную, экспоненциальную и степенную функции.

Выбор эмпирической формулы определяется классом функции, который более точно отражают связь между табличными данными. Воспользуемся графическим изображением на координатной плоскости и произведем расчет известных элементарных функций и поиск числовых параметров с расчетом поиска минимального значения метрики.

Линейная аппроксимация

Согласно экспериментальным данным снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре, представленным в таблице 1, методом наименьших квадратов определим параметры линейной эмпирической функции:

$$I(m) = a_1 \cdot m + a_0. \quad (2)$$

Основные данные для определения параметров линейной зависимости представлены в таблице 2.

В таблице 2 параметры S_2 и S_3 определяются по следующим выражениям:

$$S_2 = m^2; \quad (3)$$

$$S_3 = m \cdot \delta. \quad (4)$$

Таблица 1. Результаты экспериментов

Table 1. Experimental results

Ток образцового амперметра I , мА	50	100	150	200	250	300	350	375
Количество уровней квантования m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37

Таблица 2. Расчетные коэффициенты линейной функции**Table 2.** Calculated coefficients of the linear function

Коэффициенты									Сумма
m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140	14852
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37	66,83
S_2	173056	687241	1577536	2748964	4418404	6375625	8561476	9859600	34401902
S_3	3461,12	6872,41	10516,91	13744,82	17673,62	21252,08	24461,36	26292,27	124274,58

Количество точек исследования определяется шагом уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при испытании переменным током и равно 8.

Согласно данным, представленным в таблице 2, составим систему линейных уравнений для нахождения неизвестных параметров a_0 , a_1 линейной функции:

$$\begin{cases} 34401902 \cdot a_1 + 14852 \cdot a_0 = 124274,58 \\ 14852 \cdot a_1 + 8 \cdot a_0 = 66,83 \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему линейных уравнений методом обратной матрицы, получаем:

$$a_1 = 0,00003; \quad (6)$$

$$a_0 = 8,299. \quad (7)$$

Согласно (2) и (3) составим линейную функцию:

$$I(m) = 0,00003 \cdot m + 8,299. \quad (8)$$

Результаты практических и расчётных данных представлены на рисунке 2.

Экспоненциальная аппроксимация

Согласно экспериментальным данным, представленным в таблице 1, методом наименьших квадратов определим параметры линейной экспоненциальной функции:

$$I(m) = a_2 \cdot e^{b_1 \cdot m}. \quad (9)$$

Применяя метод наименьших квадратов, экспоненциальную функцию линеаризуем:

$$a_3 = \ln(a_2); \quad (10)$$

$$a_4 = b_2. \quad (11)$$

Расчетные коэффициенты линейной зависимости, полученные на основе аппроксимации экспоненциальной функции, представлены в таблице 3.

- 1 — график зависимости, описывающей отношение уровней квантования на входе АЦП микроконтроллера к току на образцовом амперметре;
2 — линейная эмпирическая функция

- 1 — a graph of dependence describing the ratio of the quantization levels at the input of the ADC of the microcontroller to the current at the exemplary ammeter;
2 — linear empirical function

Рисунок 2. Результаты практических и расчётных данных**Figure 2.** Results of practical and calculated data

В таблице 3 параметры S_4 , S_5 и S_6 определяются по следующим выражениям:

$$S_4 = \ln(\delta_1); \quad (12)$$

$$S_5 = m^2; \quad (13)$$

$$S_6 = m \cdot \delta. \quad (14)$$

Количество точек исследования определяется шагом уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при испытании переменным током и равно 8.

Согласно данным, представленным в таблице 3, составим систему линейных уравнений для нахождения неизвестных параметров a_0 , a_1 линейной аппроксимации:

$$\begin{cases} 34401902 \cdot a_1 + 14852 \cdot a_0 = 31550,79 \\ 14852 \cdot a_1 + 8 \cdot a_0 = 16,98 \end{cases}. \quad (15)$$

Решая систему линейных уравнений методом обратной матрицы, получаем:

$$a_1 = 4 \cdot 10^{-6}; \quad (16)$$

$$a_0 = 2,116. \quad (17)$$

Линеаризованная эмпирическая функция примет следующий вид:

$$I(m) = 4 \cdot 10^{-6} \cdot m - 2,116. \quad (18)$$

Согласно (10) и (11), определяя параметры экспоненциальной эмпирической зависимости, получаем искомую функцию (график представлен на рисунке 3):

$$I(m) = 8,299 \cdot e^{4 \cdot 10^{-6} \cdot b}. \quad (19)$$

Таблица 3. Расчетные коэффициенты линейной зависимости, полученные на основе аппроксимации экспоненциальной функции

Table 3. Calculated coefficients of the linear function dependence, obtained on the basis of approximation of the exponential function

Коэффициенты									Сумма
I	50	100	150	200	250	300	350	375	1775
m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140	14852
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37	66,83
S_4	2,12	2,12	2,13	2,12	2,13	2,13	2,12	2,13	16,98
S_5	173056	687056	1577536	2748964	4418404	6375625	8561476	9859600	34401902
S_6	881,36	1753,38	2669,07	3506,75	4475,54	5378,79	6213,24	6672,66	315550,79

I — график зависимости, описывающей отношение уровней квантования на входе АЦП микроконтроллера к току на образцовом амперметре; 2 — экспоненциальная эмпирическая зависимость

I — a graph of dependence describing the ratio of the quantization levels at the input of the ADC of the microcontroller to the current at the exemplary ammeter; 2 — exponential empirical dependence

Рисунок 3. Результаты практических и расчётных данных

Figure 3. Results of practical and calculated data

Степенная аппроксимация

Предположим, что на основании экспериментальных данных снятия уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре в качестве эмпирической функции примем степенную функцию:

$$F(m) = a \cdot m^b, \quad (20)$$

где m — количество уровней квантования;

a — единица младшего разряда;

b — степень.

Используя метод наименьших квадратов, линеаризуя степенную функцию, получим:

$$\ln F(m) = \ln a \cdot m^b. \quad (21)$$

Упрощая (21), получаем:

$$\ln F(m) = \ln a + b \cdot \ln m. \quad (22)$$

Линейная функция:

$$F = a_1 \cdot X + a_0. \quad (23)$$

Определяем коэффициенты линейной функции, аппроксимирующей экспериментальные данные:

$$X_i = \ln(I_i); \quad (24)$$

$$Y_i = \ln(m_i); \quad (25)$$

$$a_0 = \ln(a); \quad (26)$$

$$a_1 = b; \quad (27)$$

$$\delta_i = \frac{m_i}{I_i}; \quad (28)$$

$$L_i = X_i^2; \quad (29)$$

$$Z_i = X_i \cdot Y_i; \quad (30)$$

Количество точек исследования определяется шагом уровней квантования с АЦП микроконтроллера от тока на образцовом амперметре при испытании переменным током и равно 8.

Согласно данным представленным в таблице 4, составим систему линейных уравнений для нахождения неизвестных параметров a_0 , a_1 линейной аппроксимации:

$$\begin{cases} 435,85 \cdot a_1 + 58,82 \cdot a_0 = 124,87 \\ 58,82 \cdot a_1 + 8 \cdot a_0 = 16,98 \end{cases}. \quad (31)$$

Решая систему линейных уравнений методом обратной матрицы, получаем:

$$a_1 = 0,00496; \quad (32)$$

$$a_0 = 2,086; \quad (33)$$

Согласно (32) и (33) составим эмпирической функции:

$$F = 2,086 \cdot m + 0,00496; \quad (34)$$

По (26) и (27) получим степенную эмпирическую функцию:

$$F(m) = 8,0548 \cdot m^{0,0050}; \quad (35)$$

Выбор оптимальной эмпирической зависимости

Получив функции (8), (19) и (35), описывающие приближение к точкам табличной функции по методу наименьших квадратов, рассчитаем моделируемые математические показания прибора высоко-

Таблица 4. Расчетные коэффициенты линейной зависимости, полученные на основе степенной аппроксимации

Table 4. Calculated coefficients of the linear function dependence, obtained on the basis of power-law approximation

Коэффициенты									Сумма
I	50	100	150	200	250	300	350	375	1775
m	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140	14852
δ	8,32	8,29	8,37	8,29	8,41	8,42	8,36	8,37	66,83
X	6,03	6,72	7,14	7,41	7,65	7,83	7,98	8,05	58,82
Y	2,12	2,12	2,13	2,12	2,13	2,13	2,12	2,13	16,98
$L = X^2$	36,37	45,16	50,92	54,96	58,53	61,37	63,70	64,83	435,85
$Z = X \cdot Y$	12,78	14,21	15,16	15,68	16,29	16,69	16,95	17,11	124,87

вольтной испытательной установки и основную приведенную погрешность.

Основную приведенную погрешность измерения силы переменного тока определяем по формуле:

$$\gamma = \frac{I_{ИО} - I_{СА}}{I_K} \cdot 100\%; \quad (36)$$

где $I_{ИО}$ — показания ИО;

$I_{СА}$ — показания средства аттестации;

I_K — конечное значение шкалы миллиамперметра ИО.

По расчетным данным, представленным в таблице 5, определили среднее значение основной приведенной погрешно-

1 — график зависимости, описывающей отношение уровней квантования на входе АЦП микроконтроллера к току на образцовом амперметре;
2 — степенная зависимость

1 — a graph of dependence describing the ratio of the quantization levels at the input of the ADC of the microcontroller to the current at the exemplary ammeter;
2 — power dependence

Рисунок 3. Результаты практических и расчётных данных

Figure 3. Results of practical and calculated data

Таблица 5. Расчетные данные

Table 5. Calculated data

Ток образцового амперметра, мА	50	100	150	200	250	300	350	375
Количество уровней квантования	416	829	1256	1658	2102	2525	2926	3140
Расчётный ток линейной функции, мА	49,7	97,7	145,8	189,8	237,0	280,7	320,9	342,0
Основная приведенная погрешность, %	0,05	0,47	0,84	2,04	2,60	3,87	5,81	6,60
Расчётный ток экспоненциальной функции, мА	50,0	99,6	150,6	198,5	251,2	301,2	348,5	373,6
Основная приведенная погрешность, %	0,01	0,09	0,12	0,31	0,23	0,24	0,31	0,27
Расчётный ток степенной функции, мА	50,1	99,5	150,5	198,3	251,2	301,4	349,1	374,4
Основная приведенная погрешность, %	0,02	0,10	0,09	0,33	0,23	0,29	0,19	0,111

сти; так, для линейной функции основная приведенная погрешность 2,79 %, экспоненциальной функции — 0,20 %, а для степенной функции — 0,17 %.

Для проведения аттестации произведем сборку компонентов, представленных на рисунке 1, в готовое устройство прибора типа РИУ-10-М2, представленное на рисунке 4, а в программном листинге прибора РИУ-10-М2 используем степенную функцию.

Аттестация резонансной испытательной установки РИУ-10-М2 проводится по схеме, представленной на рисунке 5.

Прибор для контроля воздушной среды 1, представленный на рисунке 2, типа

МЭС-200А ЗАО НПП «Электростандарт» используется для определения области влияющих величин, характеризующих климатические воздействия с допустимым отклонением согласно ГОСТ 22261-94 «Средства измерений электрических и магнитных величин». Использовано следующее оборудование. Токоограничивающий постоянный проволочный резистор 3, представленный на рисунке 2, типа С5-35В-160 номинальным сопротивлением 2,5 кОм. Стенд электрических емкостей от 0 до 210 нФ напряжение до 30 кВ 4, представленный на рисунке 1, производства компании ООО НИЦ «Резонансные системы». Мультиметр

Рисунок 4. Резонансная испытательная установка РИУ-10-М2

Figure 4. Resonant test setup RIU-10-M2

1 — установка РИУ-10-М2; 2 — активная нагрузка; 3 — ёмкостная нагрузка;
4 — образцовый амперметр

1 — installation RIU-10-M2; 2 — activee load; 3 — capacitive load; 4 — exemplary ammeter

Рисунок 5. Схема проведения аттестации установки РИУ-10-М2

Figure 5. Scheme of attestation of the RIU-10-M2 installation

Таблица 6. Результаты аттестации**Table 6.** Results of certification

Показания аттестуемого РИУ-10-М2, мА	20,0	100,0	200,0	300,0	340,0
Показания средства аттестации, мА	19,0	100,0	200,0	300,8	340,9
Основная приведенная погрешность, %	0,29	0,00	0,00	–0,23	–0,26

цифровой 5, представленный на рисунке 2, типа 34465 производителя «Keysight Technologies Microwave Products (M) Sdn. Bhd.» (Малайзия) используется в качестве измерения переменного тока в диапазоне погрешности от 0,14 % до 0,27 % в диапазоне частот от 3 Гц до 5 кГц.

Результаты аттестации, представленные в таблице 6, получены при температуре окружающего воздуха 20,5 °С, относительной влажности воздуха 53 %, атмосферном давлении 91,11 кПа, электрическом напряжении питающей сети 219,9 В, частоте питающей сети 49,99 Гц.

В таблице 6 указана основная приведенная погрешность измерения силы переменного электрического тока в процентах при показаниях аттестуемого испытательного оборудования в миллиамперах от показаний средств аттестаций в миллиамперах.

Основную приведенную погрешность измерения силы переменного тока по формуле:

$$\gamma = \frac{I_{\text{ИО}} - I_{\text{СА}}}{I_K} \cdot 100\%; \quad (36)$$

где $I_{\text{ИО}}$ — показания ИО;

$I_{\text{СА}}$ — показания средства аттестации;

I_K — конечное значение шкалы миллиамперметра ИО.

Выводы

1. Применение методики обработки схемы измерения тока, протекающего через испытуемый объект, при испытании изоляции переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты позволяет получать среднеквадратичное значение тока в реальном масштабе вре-

мени, и, следовательно, оперативно контролировать ток в высоковольтных цепях для постоянного мониторинга с приведенной погрешностью не более 0,17 %.

2. По результатам проведения исследования создан опытно-промышленной образец резонансной испытательной установки РИУ-10-М2, и ФБУ «ЦСМ Республики Башкортостан» получен аттестат № 8/22 от 08.06.2021, протокол первичной аттестации № 8/1/118, по которой установка признана пригодной для использования при испытаниях повышенным напряжением промышленной частоты изоляции обмоток электродвигателей и других твердых диэлектриков, подачи высокого напряжения при измерении уровня частичных разрядов в изоляции, а также при проведении других измерений и проверок электрооборудования.

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 ВКУ 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.

References

1. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Kirillov R.V. Vybory 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].