



ВЛИЯНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПАСТЫ НА ИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Брагин И.Ю.¹, Пантелеева Л.А.¹, Покоев П.Н.¹, Грачева Е.И.²

¹Ижевская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Ижевск, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
<https://orcid.org/0000-0002-5416-1091>, vaniabra@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ:* рассмотреть проблему использования специальной ферромагнитной пасты, с помощью которой заполняются воздушные зазоры в магнитопроводе масляного силового трансформатора, с целью уменьшения его потерь, путем снижения вихревых токов в магнитопроводе. Провести опыты по определению динамики изменения высоковольтного пробоя трансформаторного масла, после добавления в него ферромагнитной пасты. *МЕТОДЫ.* Для решения поставленной задачи были разработаны несколько образцов ферромагнитной пасты, отличающихся друг от друга использованием разного связующего материала для ферромагнитного порошка. Образцы были помещены в емкости на несколько дней, наполненные трансформаторным маслом. С помощью электрической установки АИМ-90, проводились замеры высоковольтного пробоя трансформаторного масла каждого образца. Благодаря такому методу, получилось определить, как влияет ферромагнитная паста на изоляционные свойства трансформаторного масла. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Для наглядности, полученные результаты всех образцов были построены на графике. Исходя из графика, стало ясно, что в некоторых образцах трансформаторного масла появилось значительное количество механических примесей, образованных от ферромагнитной пасты, что крайне пагубно повлияло на изоляционные свойства масла. Также были образцы, у которых свойства масла практически не изменились. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В качестве выводов, появилось определенное видение того, какую ферромагнитную пасту можно использовать в конструкции масляного силового трансформатора, также удалось понять, какие образцы ферромагнитных паст крайне негативно влияют на изоляционные свойства трансформаторного масла.

Ключевые слова: трансформатор; ферромагнетик; вихревые токи; магнитные потери; магнитопровод; пробивное напряжение.

Для цитирования: Брагин И.Ю., Пантелеева Л.А., Покоев П.Н., Грачева Е.И. Влияние ферромагнитной пасты на изоляционные свойства трансформаторного масла// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 110-119. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-110-119.

EFFECT OF FERROMAGNETIC PASTE ON INSULATING PROPERTIES OF TRANSFORMER OIL

IY. Bragin¹, LA. Panteleeva¹, PN. Pokoev¹, EI. Gracheva²

¹Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
<https://orcid.org/0000-0002-5416-1091>, vaniabra@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the problem of using a special ferromagnetic paste, which fills the air gaps in the magnetic circuit of an oil power transformer, in order to reduce its losses, by reducing eddy currents in the magnetic circuit. Conduct experiments to determine the dynamics of change of high-voltage breakdown of transformer oil, after adding ferromagnetic paste to it. *METHODS.* To solve this problem, several samples of ferromagnetic paste have been developed, differing from each other using different binding material for ferromagnetic powder. The samples were placed in containers for several days filled with transformer oil. With the help of electrical installation AIM-90, measurements of high-voltage breakdown of transformer oil of each sample

were carried out. Thanks to this method, it was possible to determine how the ferromagnetic paste affects the insulating properties of the transformer oil. **RESULTS.** For clarity, the results of all samples were plotted. Based on the graph, it became clear that in some samples of transformer oil a significant amount of mechanical impurities formed from ferromagnetic paste appeared, which extremely negatively affected the insulating properties of the oil. There were also samples in which the properties of the oil practically did not change. **CONCLUSION.** As conclusions, there was a certain vision of which ferromagnetic paste can be used in the design of an oil power transformer, it was also possible to understand which samples of ferromagnetic pastes extremely negatively affect the insulating properties of the transformer oil.

Keywords: transformer; ferromagnetic; eddy currents; magnetic losses; magnetic conductor; breakdown voltage.

For citation: Bragin IY, Panteleeva LA, Pokoev PN, Gracheva E.I Effect of ferromagnetic paste on insulating properties of transformer oil. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):110-119. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-110-119.

Введение

Научную новизну результатов исследования составляют:

- полученный состав ферромагнитной пасты с высокой магнитной проницаемостью и высокой вязкостью, предназначенной для заполнения стыков (зазоров) сердечника масляного трансформатора, собираемого из листов электротехнической стали, не оказывает негативного влияния на изоляционные свойства трансформаторного масла, что ведет к уменьшению потерь в трансформаторе.

Практическая значимость исследований составляет:

- обработка сердечника силового трансформатора, собранного из листов электротехнической стали, путем заполнения воздушных зазоров магнитопровода ферромагнитной пастой, ведёт к снижению его магнитного сопротивления.

В передаче, преобразовании и распределении электрической энергии важную роль выполняют трехфазные силовые трансформаторы. Необходимость в многократном повышении первичного напряжения генераторов, а затем в понижении конечного подаваемого напряжения к потребителям, приводит к значительному увеличению количества отдельных трансформаторов. В распределительных сетях номинальная мощность отдельных трансформаторов уменьшается, а их общее количество растет. В следствие этих причин, общая установленная мощность трансформаторов, в несколько раз превышает установленную мощность генераторов электростанций.

Каждый в отдельности трансформатор, является весьма современным преобразователем активной мощности, работает с коэффициентом полезного действия на уровне 98-99%. В процессе своей работы трансформатор потребляет из сети не только активную, но и реактивную мощности, расходуемые на трансформацию напряжения и тока. При необходимости многократной трансформации напряжения и размещения относительно большого количества трансформаторов в электрической сети, общие потери активной и перетоков реактивной энергии достигают существенных значений. Поэтому, требование уменьшения потерь активной и перетоков реактивной энергии в сетях является актуальной проблемой.

Настоящая работа направлена на уменьшение потерь активной и потребления полной намагничивающей мощности в режиме холостого хода трансформатора

Литературный обзор

Силовые трансформаторы изготавливаются согласно определенной технологии, которая подразумевает сборку магнитопровода из тонких шихтованных пластин электротехнической стали [1]. Такая технология сборки позволяет снизить магнитные потери трансформатора. Потери мощности, являются основной экономической характеристикой трансформатора, когда магнитный поток индуцирует электродвижущую силу, создается ток не только в обмотке трансформатора, но и в самом магнитопроводе [2]. При протекании магнитного потока по магнитопроводу трансформатора, образуются вихревые токи. Величина вихревых токов может достигать больших значений, что в свою очередь ведет к нагреву трансформатора и снижению экономической эффективности. Шихтовка магнитопровода трансформатора из тонких пластин электротехнической стали помогает появление вихревых токов, уменьшая магнитные потери [3].

При шихтовке магнитопровода трансформатора, в местах стыков пластин электротехнической стали, остаются небольшие воздушные зазоры, обладающие высоким магнитным сопротивлением. Прохождение магнитных линий через воздушный зазор

затрудняется, т.к. воздух обладает низкой магнитной проницаемостью, в связи с чем, магнитные линии начинают проходить через соседние прилегающие пластины, минуя воздушный зазор, что приводит к появлению вихревых токов. Наличие даже небольшого количества вихревых токов, негативно сказывается на экономической эффективности силового трансформатора [4, 5].

Для решения такой важной проблемы, было предложено заполнять воздушные зазоры специальным материалом, обладающим высокой магнитной проницаемостью. Таким свойством обладает железный ферромагнитный порошок марки Р-10 [6]. Проведенные испытания показали, что данный порошок обладает высокой магнитной проницаемостью при высоких и низких температурах, при которых происходит работа силовых трансформаторов в условиях реальной эксплуатации [7]. Для подтверждения работоспособности решения проблемы - воздушные зазоры в магнитопроводе трансформатора были заполнены ферромагнитным порошком Р-10, с последующим снятием опыта холостого хода трансформатора, которые показали снижение магнитных потерь и подтвердили работоспособность предлагаемого решения [8]. При проведении опыта холостого хода трансформатора, был выявлен значительный недостаток применения ферромагнитного порошка – из-за его мелкодисперсности, от вибрации на холостом ходу трансформатора, большая часть порошка высыпалась из магнитопровода.

Для устранения сыпучести ферромагнитного порошка, была разработана и испытана специальная ферромагнитная паста, за основу которой был взят все тот же порошок марки Р-10, но с добавлением вязкого материала. Проведенные опыты с ферромагнитной пастой показали устранения недостатка сыпучести порошка Р-10. Пасту достаточно просто изготовить, а благодаря высокой вязкости, легко наносить на магнитопровод трансформатора, заполняя все воздушные зазоры. В качестве подтверждения работоспособности ферромагнитной пасты, был проведен опыт по снижению потерь мощности на трехфазном силовом трансформаторе, результат получился крайне положительным – удалось снизить потери на 15% [9].

Опыты, проводимые с ферромагнитной пастой, были выполнены на трансформаторе без системы охлаждения, для работы которого не требуется использование трансформаторного масла. В электросетевых организациях используются маслonaполненные силовые трансформаторы, у которых, в качестве дополнительной изоляции обмоток и их охлаждения, используется трансформаторное масло. На сегодняшний день, масляные трансформаторы встречаются в распределительных электрических сетях, а также в электросетях крупных промышленных комплексов гораздо чаще, чем «сухие» трансформаторы. Масляные трансформаторы отличаются высокой надежностью и стойкостью к перепадам температурных режимов [10].

Технология сборки магнитопровода масляного трансформатора аналогична «сухому» трансформатору, следовательно, в магнитопроводе масляного трансформатора имеются воздушные зазоры в местах стыка пластин электротехнической стали, что в свою очередь приводит к снижению экономических показателей трансформатора.

Проведенные опыты с использованием ферромагнитной пасты на «сухом» трансформаторе показали положительный результат снижения магнитных потерь [11]. Для использования пасты в масляных трансформаторах, предстоит выполнить опыт, определяющий степень взаимодействия трансформаторного масла и пасты. Негативное влияние пасты на масло, может привести к поломке трансформатора [12]. По результату проведенного опыта, можно будет сделать окончательный вывод, стоит ли использовать ферромагнитную пасту с целью заполнения воздушных зазоров в магнитопроводе масляного трансформатора.

Целью исследования является изучение влияния ферромагнитной пасты на изоляционные свойства трансформаторного масла.

Задачи исследования:

1. Подготовить несколько образцов ферромагнитной пасты, в основе которой будут использоваться разные связующие материалы;
2. Подготовить лабораторную установку для проведения испытания трансформаторного масла;
3. Определить степень снижения свойств трансформаторного масла, после добавления ферромагнитной пасты.

Материалы и методы

Трансформаторное масло – масло с низкой вязкостью и высокой чистотой, применяющееся для заливки в силовые трансформаторы. Служит для изоляции

находящихся под напряжением частей и узлов трансформатора, а также отвода тепла от нагревающихся при работе трансформатора частей [13].

Наиболее важное условие использования трансформаторного масла – это его пробивное напряжение. Пробивное напряжение очень чувствительно к наличию примесей в масле. При наличии влаги и примесей, довольно быстро снижается электрическая стабильность трансформаторного масла. Трансформаторное масло, не имеющее в себе влаги и примесей, в независимости от его химического состава, имеет высокое, необходимое для работы оборудования, пробивное напряжение – более 50 кВ [14, 15, 16].

В ходе проведения эксперимента взаимодействия трансформаторного масла с ферромагнитной пастой, планируется отталкиваться на показатель высоковольтного пробоя, как на результат величины взаимодействия пасты с маслом.

В качестве эталонного показателя характеристик трансформаторного масла, использовалось новое масло Лукойл ВГ, ТУ 38.401-58-177-96, произведенное на основе минерального базового масла с применением гидрокаталитических процессов, содержащее антиокислительную присадку. Данное масло применяется в трансформаторах с напряжением до 1150 кВ включительно.

Ферромагнитный порошок – это твердый материал, способный намагничиваться под действием внешнего магнитного поля и частично сохранять приобретенную намагниченность после удаления внешнего поля. Это вещество, в котором магнитные моменты атомов и ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, а результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля. Когда возникает внешнее магнитное поле – магнитные моменты доменов приобретают ориентирование в сторону этого поля и ферромагнитное вещество начинает намагничиваться.

Основой в ферромагнитной пасте использовался мелкодисперсный ферромагнитный порошок марки Р-10 (рис. 1), который обладает высокой магнитной проницаемостью и легко смешивается с различными связующими материалами [17].



Рис. 1. Фотография ферромагнитного порошка марки Р-10 *Fig. 1. Photograph of ferromagnetic powder R-10*

Связующие материалы – требуются для превращения сыпучего ферромагнитного порошка в густую пасту, для исключения высыпания порошка из магнитопровода при вибрации трансформатора во время работы, также, вязкие свойства пасты позволяют легко заполнять все воздушные зазоры в магнитопроводе.

В опытных образцах ферромагнитной пасты было решено сравнить сразу несколько связующих материалов: Циатим-201, Циатим-203, Циатим-211, Графитная смазка, Медная смазка. (рис. 2) Все выбранные материалы обладают высокой вязкостью, благодаря которой, получается достичь густой консистенции ферромагнитной пасты для удобного нанесения ее на магнитопровод.



Рис. 2. Фотографии связующих материалов для ферромагнитного порошка 1 – Графитная смазка; 2 – Циатим-201; 3 – Циатим-211; 4 – Циатим-203; 5 – Медная смазка *Fig. 2. Photographs of ferromagnetic powder binders 1 - Graphite grease; 2 - Tsiatim-201; 3 - Tsiatim-211; 4 - Tsiatim-203; 5 - Copper grease*

Испытательная установка – использовался испытательный аппарат АИМ-90. (рис. 3, рис. 4). Этот аппарат представляет собой генераторное устройство, которое заполняется трансформаторным маслом. Внутри находится трансформатор, от которого высокое напряжение выводится через специальные изоляторы. Они служат опорой для установки измерительной ячейки. Зона аппарата, где устанавливается ячейка, имеет крышку, которая при закрытии замыкает контакты на цепи включения, а при открытии крышки – размыкает эти контакты. Повышение напряжения на электродах ячейки производится регулятором напряжения плавно с помощью электропривода. После достижения пробоя трансформаторного масла, на табло фиксируется величина в мА (1мА=10кВ), после чего регулятор напряжения возвращается в исходное положение.



Рис. 3. Фотография электроприбора АИМ-90

Fig. 3. Photograph of the electrical appliance AIM-90

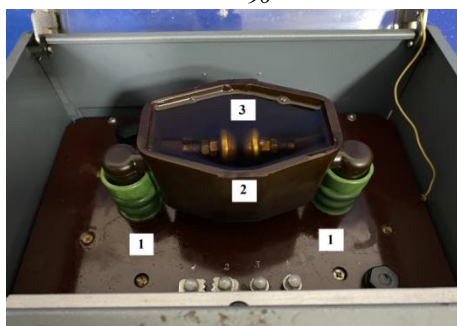


Рис. 4. Внутренние части электроприбора АИМ-90: 1 – опорные изоляторы; 2 – измерительная ячейка; 3 – электроды

Fig. 4. Internal parts of electrical appliance AIM-90: 1 - support insulators; 2 - measuring cell; 3 - electrodes

Опытные образцы:

Изготовленные ферромагнитные пасты, в основе которых использовался ферромагнитный порошок марки Р-10, а в качестве связующих материалов использовались:

1. Графитная смазка;
2. Медная смазка;
3. Циатим-201;
4. Циатим-203;
5. Циатим-221.

Для удобства проведения опытов, были использованы стеклянные ёмкости объемом 0.5 литра, на дно которых поместили образцы ферромагнитных паст (рис 5).



Рис. 5. Фотография подготовленных образцов ферромагнитных паст

Fig. 5. Photograph of prepared ferromagnetic paste samples



Рис. 6. Фотография подготовленных образцов трансформаторного масла с ферромагнитной пастой

Ёмкости заполнялись чистым трансформаторным маслом. (рис 6) Далее происходила имитация работы трансформаторного масла – ёмкости нагревались до +70°C, после чего охлаждались до +5°C. Данная технология позволяла приблизиться к реальным рабочим условиям масла, т.к. во время работы трансформатора, происходит нагрев и охлаждение масла в закономерности от величины нагрузки на трансформатор и погодных условий. В процессе нагрева, слои трансформаторного масла начинают перемешиваться – верхние слои более горячие в то время, как нижние слои более холодные, что приводит к естественной циркуляции масла внутри трансформатора [18,19].

После проведения всех манипуляций, каждый из образцов поочередно переливался в прибор АИМ-90 для замера высоковольтного пробоя. После заполнения измерительной ячейки прибора АИМ-90 образцом трансформаторного масла (рис. 4), производилось 10 последовательных пробоев с интервалами между каждыми из них, равным 5 минут. Для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства после каждого пробоя перемешивалось масло между электродами вручную при помощи стеклянной палочки без образования воздушных пузырьков.

Результаты и обсуждение

В качестве эталонного показателя, был выполнен замер высоковольтного пробоя чистого трансформаторного масла, без добавления ферромагнитной пасты. Относительно полученного эталонного значения, производились сравнения с остальными полученными значениями образцов с ферромагнитными пастами. Полученные значения высоковольтных пробоев занесены в таблицу 1. Стоит учесть, что погрешность прибора АИМ-90 крайне незначительна и находится в пределах от 3 до 4%.

Таблица 1

Сравнение полученных результатов пробоя

Наименование образца	Полученное значение высоковольтного пробоя, (кВ)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Чистое трансформаторное масло	60	68	66	70	72	72	66	68	76	82	70
Циатим-201	30	45	40	30	36	38	30	30	34	28	34,1
Циатим-203	58	50	52	46	44	42	32	30	38	40	43,2
Циатим-221	55	60	58	54	54	56	54	54	58	62	56,5
Медная смазка	46	50	42	54	49	52	41	58	56	46	49,4
Графитная смазка	56	58	60	58	52	56	64	58	58	60	58

Для удобства сравнения полученных результатов, было высчитано среднее значение высоковольтного пробоя каждого образца и занесено в таблицу в столбец «Среднее». Самое высокое среднее значение показало чистое трансформаторное масло – 70 кВ. Остальные образцы показали средний пробой значительно ниже чистого масла. Отсюда следует вывод, что ферромагнитная паста оказывает негативное влияние на трансформаторное масло.

Вторым по результату оказался образец с Графитной смазкой – 58 кВ, после него образец с Циатим-221 – 56,5 кВ. Самое низкое значение пробоя показал образец с Циатим-201. Результаты среднего значения высоковольтных пробоев данных образцов удовлетворяют минимальному значению работоспособности трансформаторного масла [20,21].

Для того, чтобы наглядно можно было увидеть нелинейность значений высоковольтных пробоев всех образцов, был построен общий график, который показан на рисунке 7.

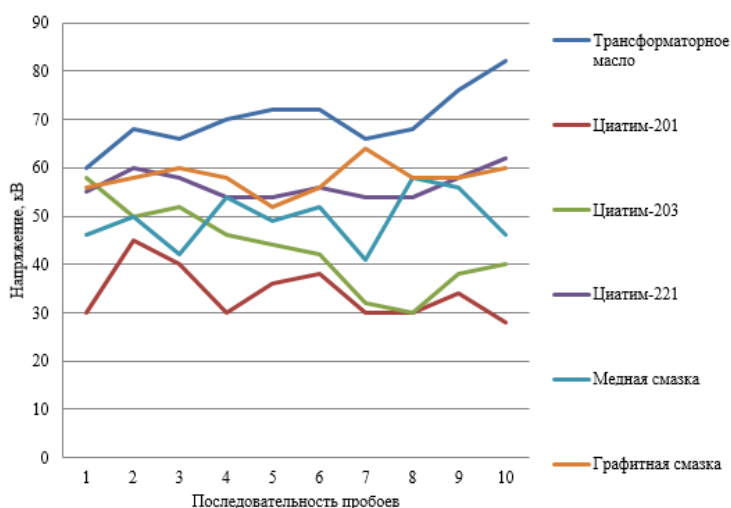


Рис. 7. График полученных значений высоковольтного пробоя всех образцов *Fig. 7. Graph of obtained values of high-voltage breakdown of all samples*

На графике хорошо видно, что у некоторых образцов, таких как трансформаторное масло, Циатим-221 и Графитная смазка – результат прямолинейный, относительно других образцов. Высокая амплитуда значений пробоя изоляции у таких образцов, как Циатим-201, Циатим-203 и Медная смазка, объясняется тем, что после добавления ферромагнитной пасты с этими связующими материалами в трансформаторное масло, образуются мелкие токопроводящие частицы с примесями, которые сильно снизили изоляционное свойство масла. Это говорит о том, что такие образцы ферромагнитных пасть крайне нерекомендуемые в применение с масломполненными трансформаторами.

Для более удобной наглядности того, насколько сильно снизился высоковольтный пробой трансформаторного масла после добавления в него ферромагнитной пасты, на рисунке 8 изображен график всех образцов в порядке уменьшения значения среднего пробоя.

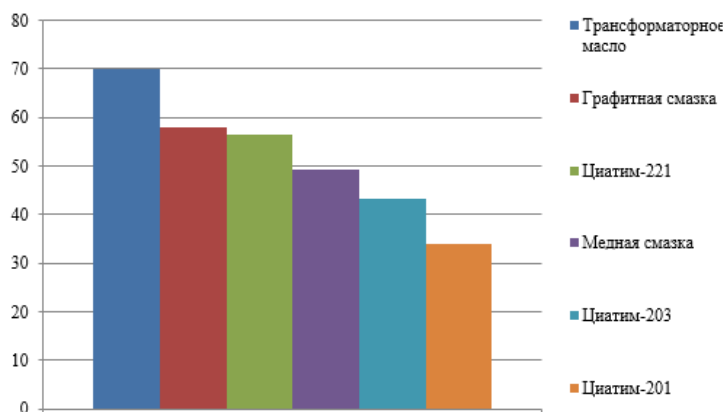


Рис. 8. График сравнения среднего значения высоковольтного пробоя всех образцов *Fig. 8. Graph of comparison of average value of high-voltage breakdown of all samples*

Заключение

Из полученных результатов, следует вывод, что для дальнейшего использования ферромагнитной пасты в масляных силовых трансформаторах удовлетворяют образцы паст с такими связующими материалами, как Графитная смазка и Циатим-221. Трансформаторное масло с данными образцами оказывают минимальное воздействие на характеристики трансформаторного масла, что подтверждается величиной значения среднего высоковольтного пробоя равным 58 кВ у образца с Графитной смазкой и 56,5 кВ у образца с Циатим-221 в то время, как минимальное требуемое значение пробоя составляет 50 кВ.

Остальные образцы (Медная смазка, Циатим-201 и Циатим-203) показали неудовлетворительный результат высоковольтного пробоя, среднее значение ниже необходимого.

Трансформаторное масло проходит проверку на пригодность использования одновременно по нескольким показателям. В объем проверки трансформаторного масла,

помимо высоковольтного пробоя изоляции, входит проверка на прозрачность – в масле не должно содержаться механических частиц и примесей, оно должно быть полностью прозрачным [22]. Существует проверка трансформаторного масла на температуру вспышки, когда замеряется температура, при которой происходит вспыхивание смеси паров масла с воздухом при поднесении открытого пламени. Обязательно проводится полный физико-химический анализ масла, благодаря которому можно узнать о количестве содержания в масле влаги, газов и механических частиц [23,24]. После вышеперечисленных проверок составляется заключение о пригодности трансформаторного масла для использования в электрооборудовании.

Литература

1. Богородицкий, Н.П. Электромеханические материалы // Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. 6-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1977. 322 с.
2. Долгопол Т.Л., Черниченко А.В., Галинов Д.С. Анализ способов снижения потерь холостого хода силовых трансформаторов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции: электронный сборник, Кемерово, 19–21 декабря 2018 года / Под редакцией В.Г. Каширских, И.А. Лобур. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018.
3. Бирюлин В.И., Чернышев А.С., Зуб О.С. Прогнозирование потерь электроэнергии на подстанциях // Электрика. 2013. № 5. С. 02-03.
4. Ваганов М.А. Трансформаторы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 112 с.
5. Богородицкий, Н.П. Электромеханические материалы // Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. 6-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1977. 322 с.
6. Брагин И.Ю., Пантелеева Л.А., Покоев П.Н., Брагин И.Ю. Влияние ферромагнитной пасты на характеристики трансформатора // Технологические тренды устойчивого функционирования и развития АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной году науки и технологии в России. 24–26 февраля 2021 года, г. Ижевск. Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2021. С. 90 - 94.
7. Захаров М.А., Брагин, И.Ю. Покоев П.Н и др. Испытание магнитных свойств ферромагнитной пасты при разных температурах // Инновационный потенциал сельскохозяйственной науки XXI века: вклад молодых ученых-исследователей: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 24-27 октября 2017 года, г. Ижевск. Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2017. С. 198-200.
8. Покоев, П. Н. Испытание удельного сопротивления ферромагнитной пасты / П. Н. Покоев // Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции. 13–16 февраля 2018 года, г. Ижевск. В 3 Т. Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2018. Т. 3. С. 85 - 88.
9. Брагин И.Ю., Лекомцев П.Л., Пантелеева Л.А и др. Разработка и исследование ферромагнитной пасты повышенной вязкости // Нижегородский государственный инженерно-экономический университет Вестник НГИЭИ. 2020. №6 (109). С. 36-48.
10. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / М.: НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.
11. Патент на полезную модель №143671 RU МПК H01F 27/245 / Магнитопровод, собранный из пластин электротехнической стали, места стыков которых перекрыты материалом с высокой магнитной проницаемостью / заявка №2013130526. Зарегистрировано 26.06.2014. Опубликовано 27.07.2014 Бюл. №21.
12. Валиуллина Д.М., Загустина И.Д., Козлов В.К. Определение качественного состава примесей в отработанном трансформаторном масле // Казань: Вестник КГЭУ. 2018. Т.10 №4 (40). С. 25-32.
13. Вагапов Т.Р., Волкова Т.Р. Трансформаторное масло как диагностическая среда силовых трансформаторов // Электротехнические комплексы и системы: матер. междунар. науч.-практ. конф. 2016 С. 39-42.
14. Виды испытаний трансформаторного масла [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://leg.co.ua/info/transformatory/> (дата обращения: 20.11.2021).
15. Karthik R., Sree Renga Raja T. Investigations of transformer oil characteristics // IEEJ Trans Elec Electron Eng. 2012. V. 7. P. 369-374.
16. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20. Iss. 1. P. 346-355.
17. Брагин, И.Ю. Сравнение ферромагнитных свойств различных материалов / И.Ю. Брагин, Л.А. Пантелеева, и др. // Вестник Ижевской ГСХА. 2021. №2 (66). С. 37-42.

18. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов. М.: Издательский центр «Академия», 2003.
19. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высших учебных заведений. 2-е изд. Перераб. и доп. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
20. Vezir Rexhepi. An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring. Energy Procedia. V. 141. December 2017. Pp. 418-422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.053>.
21. Mangara BT. On some methods of reliability improvement of engineering systems. Bloemfontein, Free State, South Africa: University of the Free State; 2015 p. 155.
22. Копылов, И.П. Электрические машины: 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2002. 607 с.
23. Лещинская, Т.Б., Наумов, И.В. Электроснабжение сельского хозяйства. М.: Колосс, 2008. 665 с.
24. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 528 с.

Авторы публикации

Брагин Иван Юрьевич – аспирант, Ижевской государственной сельскохозяйственной академии.

Пантелеева Лариса Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники, электрооборудования и электроснабжения (ЭЭиЭ), Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Покоев Пётр Николаевич – старший преподаватель кафедры электротехники, электрооборудования и электроснабжения (ЭЭиЭ), Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Bogoroditsky NP, Pasyukov VV., Tareev BM. *Electromechanical materials*. 6th ed., reprint. L.: Energiya, 1977. 322 p.
2. Dolgopol TL, Chernichenko AV, Galinov DS. *Analysis of ways to reduce idling losses of power transformers*. Power engineering and energy saving: theory and practice: Collection of materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference: electronic collection, Kemerovo, December 19-21, 2018 / Edited by V.G. Kashirskikh, I.A. Lobur. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2018.
3. Biryulin V.I., Chernyshev A.S., Zub O.S. Forecasting of electricity losses at substations. *Electrica*. 2013;5;02-03.
4. Vaganov M.A. *Transformers: textbook*. stipend. St. Petersburg: Publishing house of SPbSETU «LETI», 2014. 112 p
5. Bogoroditsky NP, Pasyukov VV, Tareev BM. *Electromechanical materials*. 6th ed., reprint. L.: Energy, 1977. 322 p.
6. . Yu. Bragin, Panteleeva LA, Pokoev PN, Bragin IYu. *Influence of ferromagnetic paste on transformer characteristics*. Technological trends of sustainable functioning and development of agroindustrial complex: Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the Year of Science and technology in Russia. February 24-26, 2021, Izhevsk. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2021. pp. 90-94.
7. Zakharov MA, Bragin IYu, Pokoev PN, et al. *Testing of magnetic properties of ferromagnetic paste at different temperatures. Innovative potential of agricultural science of the XXI century: contribution of young scientists and researchers: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. October 24-27, 2017, Izhevsk. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2017. pp. 198-200.
8. Pokoev PN. *Testing the resistivity of ferromagnetic paste*. Innovative technologies for the implementation of the program of scientific and technical development of agriculture: materials of the International scientific and practical Conference. February 13-16, 2018, Izhevsk. In 3 Vols. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2018;3:85-88.

9. Bragin IYu, Lekomtsev PL, Panteleeva LA, et al. Development and research of ferromagnetic paste of increased viscosity. *Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics Bulletin of NGIEI*. 2020;6 (109):36-48.
10. Alekseev BA. Condition control (diagnostics) of large power transformers. M.: NC ENAS, 2002. 216 p.
11. Noskov VA. Utility model patent No. 143671 RU IPC H01F 27/245 / Magnetic circuit assembled from plates of electrical steel, the joints of which are covered with a material with high magnetic permeability / application no. 2013130526. Registered on 26.06.2014. Published on 27.07.2014 Byul. No. 21.
12. Valiullina D.M., Zagustina I.D., Kozlov V.K. Determination of the qualitative composition of impurities in spent transformer oil. Kazan: *Bulletin of the KSPEU*. 2018;10:4 (40):25-32.
13. Vagapov T.R., Volkova T.R. *Transformer oil as a diagnostic medium of power transformers*. Electrotechnical complexes and systems: mater. international Scientific and Practical conference 2016 pp. 39-42.
14. Types of transformer oil tests [Electronic resource]. Access mode: <https://leg.co.ua/info/transformatory/> (accessed: 20.11.2021).
15. Karthik R., Sree Renga Raja T. *Investigations of transformer oil characteristics*. IEEJ Trans Elec Electron Eng. 2012;7:369-374.
16. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. *Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013;20(1):346-355.
17. Bragin, I.Yu. Comparison of ferromagnetic properties of various materials / I.Yu. Bragin, L.A. Panteleeva, [et al.]. *Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*. 2021;2 (66):37-42.
18. Bystritsky G.F., Kudrin B.I. *Selection and operation of power transformers*. Moscow: Publishing Center «Academy», 2003.
19. Voldek, A.I. *Electric machines: textbook for students of higher educational institutions*. 2nd ed. Pererab. and additional. L.: Energiya, 1974. 840 p.
20. Vezir Rexhepi. *An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring*. Energy Procedia. 141. December 2017;141:418-422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.053>.
21. Mangara BT. *On some methods of reliability improvement of engineering systems*. Bloemfontein, Free State, South Africa: University of the Free State; 2015 p. 155.
22. Kopylov I.P. *Electric machines: textbook for universities*. 3rd ed., ispr. M.: Higher School, 2002. 607 p.
23. Leshchinskaya, T.B., Naumov, I.V. *Power supply of agriculture*. M.: KolosS, 2008. 665 p.
24. Tikhomirov, P.M. *Calculation of transformers: textbook*. Manual for universities. 5th ed., reprint. and additional. M.: Energoatomizdat, 1986. 528 p.

Authors of the publication

Ivan Yu. Bragin – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Larisa A. Panteleeva – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Peter. N. Pokoev – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

12.09.2022г.

Отредактировано

27.09.2022г.

Принято

27.09.2022г.