

На правах рукописи

Шлюпиков Сергей Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МАСЛА
ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 10/0,4 кВ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова».

Научный руководитель: **Трушкин Владимир Александрович,**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Вахнина Вера Васильевна,**
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Электроснабжение
и электротехника» ФГБОУ ВО
«Тольяттинский государственный
университет»
Менщиков Игорь Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Электроснабжение
промышленных предприятий» ФГБОУ ВО
«Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет»

Защита диссертации состоится «27» мая 2016 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и на сайте www.sgau.ru.

Отзывы на автореферат направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1.

E-mail: chekmarev.v@yandex.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Чекмарев
Василий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Мировая практика подтвердила, что надежное и эффективное электроснабжение сельского хозяйства позволяет не только обеспечить электрификацию всего производства, но и успешное развитие АПК и условий жизни на селе.

Эффективность электрификации сельскохозяйственного сектора определяется бесперебойностью электроснабжения всех его отраслей. Увеличение производства сельскохозяйственной продукции, ее переработки и сохранности требует создания и внедрения новых электрифицированных технологий и оборудования.

Главным направлением повышения бесперебойности и сохранения надежности электроснабжения сельского хозяйства служит качественная и своевременная техническая эксплуатация электрической системы, и в первую очередь трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, поскольку от их состояния зависит частота и длительность отключений. Однако удаленность таких трансформаторов от ремонтных баз, их массовый износ сдерживают реализацию даже простых мер технического обслуживания. Более 60 % таких трансформаторов имеют срок службы свыше 25 лет. Замена их требует значительных капиталовложений.

Основным элементом, определяющим работоспособность трансформатора, служит состояние его изоляции, и прежде всего, эксплуатационного масла, которое может выполнять свои функции в течение длительного времени при своевременном восстановлении его свойств. Установленная периодичность диагностирования масла из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, отработавших нормативный срок службы, путем отбора проб и испытания их в лаборатории не позволяет своевременно определить начало происходящих в нем процессов деградации.

Затраты на диагностирование масла достигают 40 % от совокупной стоимости технической эксплуатации трансформатора. Снизить данные затраты можно путем создания средств диагностирования масла на месте размещения трансформатора. Это позволит перейти к послеосмотровому способу его технической эксплуатации. Поэтому совершенствование диагностирования масла трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, – актуальная научно-техническая задача.

Диссертационная работа входит в перечень приоритетных научных направлений развития Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова по теме № 2 «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК».

Степень разработанности темы. Исследованиями процессов старения изоляционной системы «твердая изоляция – масло» трансформаторов занимались как отечественные, так и зарубежные ученые: А.А. Пястолов, Г.П. Ерошенко, М.И. Шахнович, Б.В. Ванин, А.С. Серебряков, В.В. Пучковский, Г.В. Хромова, Г.А. Филиппов, Л.Г. Разумова, А.В. Рябков, Е. Штерн, Ф. Эварс, Ф. Кларк, Г. Штергер, Д. Вайда, Б. Геллер и др.

В работах Г.А. Митрофанова, И.Н. Полякова, М.Ю. Стрельникова описаны специальные устройства для диагностирования масла в процессе эксплуатации трансформатора без снятия напряжения, которые присоединялись к системе регенерации масла.

Диссертационное исследование направлено на сохранение работоспособности трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, отработавших нормативный срок службы, и снижение затрат на диагностирование масла.

Цель работы – разработка способа экспресс-диагностирования масла трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ на месте их размещения.

Задачи исследования:

– выполнить анализ условий эксплуатации трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ и причин их отказов в системах сельского электроснабжения;

– определить влияние срока службы трансформаторов на периодичность диагностирования масла;

– определить диагностические параметры масла и разработать методику диагностирования на месте размещения трансформатора;

– разработать и изготовить технические средства для экспресс-диагностирования масла;

– провести лабораторные и производственные испытания для проверки теоретических результатов;

– определить экономическую эффективность разработанного способа экспресс-диагностирования масла.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– определении периодичности диагностирования масла трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, отработавших нормативный срок службы;

– разработке способа экспресс-диагностирования масла на месте размещения трансформатора;

– введении нового диагностического параметра масла – индекса влажности (ИВ) и установлении его нормативных значений.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– Обоснована возможность повышения вероятности безотказной работы трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, отработавших нормативный срок службы.

- Определены основные параметры качества масла: индекс влажности, удельное объемное сопротивление, прозрачность и внешний вид.
 - Теоретически обосновано определение индекса влажности.
 - Разработан и обоснован способ экспресс-диагностирования масла.
 - Разработано устройство для диагностирования масла на месте размещения трансформатора (патент RU 127479).
 - Создана электрическая схема измерения индекса влажности и удельного объемного сопротивления масла.
 - Снижены эксплуатационные затраты на диагностирование масла.
- Годовая экономия от применения предлагаемого способа экспресс-диагностирования масла в рамках одних районных электрических сетей (РЭС) составляет 281610 руб.

Производственные испытания опытного образца измерительной ячейки были проведены в Питерских РЭС Саратовской области.

Полученные результаты могут быть использованы конструкторскими организациями и эксплуатационными службами при создании и модернизации трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ путем установки на них измерительной ячейки для проведения экспресс-диагностирования масла.

Методология и методы исследования. В работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследования, современные положения теории электротехнических материалов, надежности и метрологии. Обработка экспериментальных исследований осуществлялась на ПЭВМ. При испытаниях были применены современные средства измерительной техники.

Положения, выносимые на защиту:

- периодичность диагностирования масла из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, отработавших нормативный срок службы;
- способ экспресс-диагностирования масла с помощью предложенной измерительной ячейки;
- теоретическое обоснование определения индекса влажности и электрическая схема его измерения;
- теоретические и экспериментальные зависимости индекса влажности от абсолютной влажности масла;
- экономическая эффективность способа экспресс-диагностирования масла.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждены достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также результатами анализа статистических материалов.

Содержание работы и основные результаты были обсуждены и получили положительную оценку:

– на отчетных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава СГАУ им. Н.И. Вавилова (г. Саратов, 2010–2015 гг.);

– на I–VI Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2010–2015 гг.);

– на Международной научно-практической конференции «Интеграция науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО» (г. Волгоград, 2013 г.);

– на конкурсе научно-исследовательских проектов молодых ученых СГАУ им. Н.И. Вавилова «Инновационная наука – молодой взгляд в будущее» (г. Саратов, 2012, 2014, 2015 гг.);

– на Международной конференции «Разработки молодых ученых в области повышения энергоэффективности использования топливно-энергетических ресурсов» в рамках XVI специализированной выставки «Энергетика. Энергоэффективность. 2014» (г. Саратов, 2014 г.);

– на VIII Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций (г. Саратов, 2013 г.), где устройство контроля качества трансформаторного масла было удостоено Почетной грамоты.

По результатам исследования опубликовано 12 печатных работ, в т. ч. 3 – в рецензируемых научных изданиях. Общий объем публикаций – 2,78 печ. л., из которых 1,49 печ. л. принадлежат лично соискателю.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 116 страницах компьютерного текста, содержит 10 таблиц, 25 рисунков, 13 приложений. Список используемой литературы включает в себя 122 наименования, в том числе 5 – на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы и изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** «Постановка задач исследования» приведена общая характеристика изучаемой проблемы, выбрано направление и обоснованы основные задачи исследования. Проанализированы особенности эксплуатации трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ в сельских электрических сетях, причины их отказов, способы и технические средства диагностирования влажности масла.

Анализ статистических материалов показал, что из общего числа трансформаторных подстанций напряжением 6-10-35/0,4 кВ Саратовской области 90 % приходится на долю трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, установленных в сельском хозяйстве, из которых более 60 % имеют срок службы свыше 25 лет. Данные трансформаторы размещены

на всей территории Саратовской области неравномерно, среднее расстояние до районного центра – более 70 км.

Согласно результатам анализа, ежегодно выходят из строя в среднем 10 % трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, около 50 % отказов связано со снижением в них уровня изоляции, из которых 12 % – с влажностью масла. Следует отметить, что основными причинами снижения уровня изоляции являются старение и влажность масла. Поэтому можно утверждать, что из-за влажности масла отказывает более 12 % трансформаторов.

Обзор способов и средств диагностирования влажности масла свидетельствует о достаточной разработанности этого направления. Однако специализированное оборудование сосредоточено в областных центрах. В РЭСах число таких средств ограничено или они полностью отсутствуют, что затрудняет диагностирование масла.

В конце главы обоснованы задачи исследования.

Во **второй главе** «Теоретическое обоснование способа диагностирования масла трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, отработавших нормативный срок службы» рассмотрены процессы старения масла, установлена периодичность его диагностирования с учетом срока службы трансформатора, выбраны и обоснованы диагностические параметры масла, разработана теория определения индекса влажности масла.

В процессе эксплуатации свойства масла непрерывно ухудшаются, но могут быть многократно восстановлены проведением профилактических мероприятий: фильтрации, очистки, сушки, регенерации и т.п. Главная задача эксплуатационной службы – своевременно заметить начало изменения качества масла и провести соответствующие профилактические мероприятия. Для этого необходимо выбрать параметры масла, несущие наибольшую информацию о его свойствах, и контролировать их. Результаты ухудшения этих параметров будут служить основанием для проведения более глубокого лабораторного анализа проб масла с целью выявления в нем дефектов.

Анализ процессов старения масла показал, что главным катализатором, способствующим их ускорению, служит появление в нем влаги. Это воздействие усиливается кислородом, температурой, каталитическим действием металлов, окислением и другими факторами. Таким образом, качество масла в большей степени зависит от содержания в нем влаги.

Периодичность диагностирования масла из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ регламентирована «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭЭП) и местными инструкциями. Обычно они не учитывают срок службы трансформаторов. Для масла такой подход не оправдан, поскольку скорость его старения зависит от продолжительности эксплуатации трансформатора.

Для учета влияния срока службы трансформатора на периодичность диагностирования масла использован основной закон надежности:

$$P(t) = P_0(1 - \lambda t), \quad (1)$$

где $P(t)$ – текущее значение вероятности безотказной работы (ВБР) трансформатора; P_0 – начальное значение ВБР; λ – интенсивность отказов, ч^{-1} ; t – текущее время, ч.

Графически формула (1) представлена на рисунке 1.

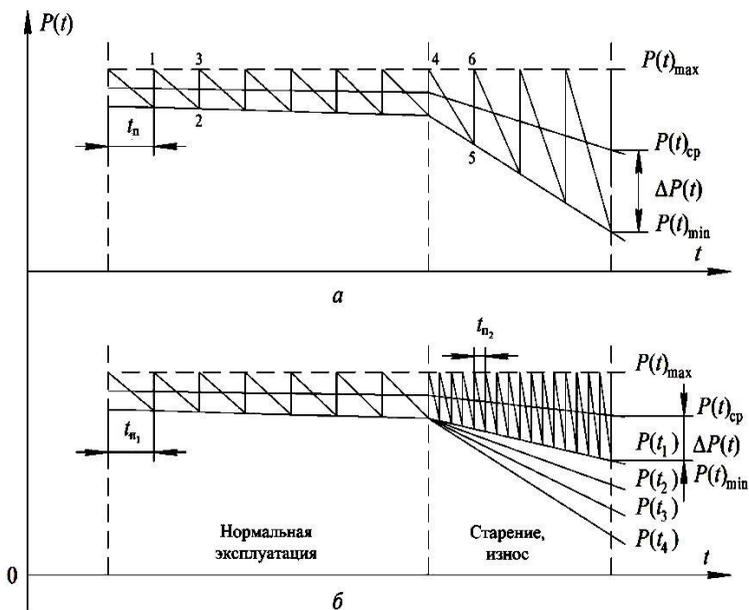


Рисунок 1 – Изменение вероятности безотказной работы трансформатора при постоянной (а) и переменной (б) периодичности диагностирования масла

При нормальной эксплуатации трансформатора (рисунок 1, а) начальная ВБР (точка 1) линейно убывает. Через период диагностирования t_n она достигает значения $P(t)_{\min}$ (точка 2). В этот момент проводят профилактические мероприятия, которые компенсируют дестабилизирующие воздействия, и ВБР возрастает до прежней величины $P(t)_{\max}$ (точка 3). В результате на всем этапе нормальной эксплуатации средняя величина ВБР $P(t)_{\text{cp}}$ сохраняет постоянное значение.

Если периодичность диагностирования масла остается неизменной, то на этапе износа трансформатора наименьшее значение ВБР $P(t)_{\min}$

резко снижается и средняя величина ВБР $P(t)_{\text{ср}}$ уменьшается, следовательно, отказы трансформатора увеличиваются.

Снизить отказы можно, если на этапе износа чаще проводить диагностирование (рисунок 1, б). Тогда средняя величина ВБР $P(t)_{\text{ср}}$ на этом этапе возрастет и число отказов уменьшится. Это означает, что целесообразно переходить от планово-предупредительного способа обслуживания к послеосмотровому на стадии износа.

Согласно ПТЭЭП, периодичность профилактических испытаний масла из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ составляет 1 раз в 4 года. В работе предложено для трансформаторов, отработавших нормативный срок службы, проводить диагностирование масла ежегодно, в периоды подготовки электрооборудования к работе в зимних условиях. Совершенно очевидно, что такая частая периодичность резко увеличивает финансовые и трудовые затраты на диагностирование. В этом заключается сущность возникшей проблемы. Она может быть решена за счет экспресс-диагностирования масла на месте размещения трансформатора. Это позволит исключить отбор проб и доставку их для испытаний в лабораторию и тем самым сократить затраты.

Для создания нового способа экспресс-диагностирования масла потребовалось решить следующие задачи: обосновать требования к периодичности диагностирования масла трансформаторов, отработавших нормативный срок службы; установить объект исследования; определить основные параметры масла и разработать технические средства для их диагностирования; обосновать возможность диагностирования масла на месте размещения трансформатора.

Требования к периодичности диагностирования масла из трансформаторов, отработавших нормативный срок службы, обоснованы ранее.

В качестве объекта исследования приняты масла марок ГК и ВГ, широко используемые в трансформаторах напряжением 10/0,4 кВ.

При разработке способа экспресс-диагностирования масла учтены следующие требования: наличие достоверной связи измеряемых параметров с качеством масла; доступность, простота и точность измерений; возможность обоснования нормативных значений диагностических параметров.

В связи с отсутствием статистических данных о качестве масла из трансформаторов напряжением 10 кВ, на первом этапе исследований выполнен анализ материалов испытательной лаборатории, а на втором – проведены экспериментальные исследования масла из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ.

Статистические материалы (около 700 протоколов испытания масла из трансформаторов 35 и 110 кВ химической лаборатории Центрального ПО филиала ПАО «МРСК Волги» – «Саратовские РС») показаны на рисунке 2. Они также свидетельствуют о том, что влажность масла связана с основными параметрами его качества: пробивным напряжением; тангенсом угла диэлектрических потерь; кислотным числом и температурой вспышки. Другими словами, влажность – интегральный параметр качества масла.

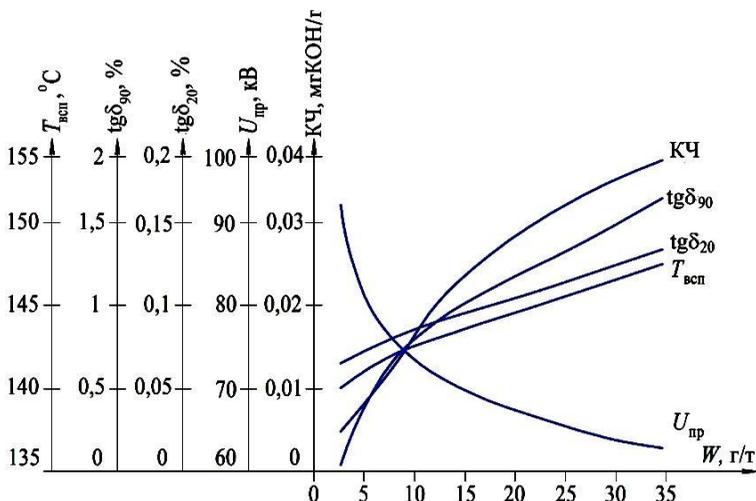


Рисунок 2 – Зависимость основных параметров качества масла от влажности:
 $U_{пр}$ – пробивное напряжение; $tg\delta_{20}$, $tg\delta_{90}$ – тангенс угла диэлектрических потерь,
 $КЧ$ – кислотное число; $T_{всп}$ – температура вспышки в закрытом тигле;
 W – влажность масла

Таким образом, для разработанного способа экспресс-диагностирования влажность принята как главный диагностический параметр масла. В качестве общей характеристики его предложены вспомогательные параметры: удельное объемное сопротивление, прозрачность и внешний вид.

Влажность оценивают как абсолютную долю воды в масле – в граммах на тонну (г/т). Суть предложенного способа состоит в сравнении эталонного образца с рабочим. В качестве эталонного образца принято заведомо «сухое» масло, а рабочего – эксплуатационное. В этом случае результат представляют в относительных единицах. Это отношение названо индексом влажности:

$$\text{ИВ} = \frac{U_3}{U_p}, \quad (2)$$

где ИВ – индекс влажности масла, о.е.; U_3 – измеренное напряжение на эталонном образце, В; U_p – измеренное напряжение на рабочем (эксплуатационном) образце, В.

Для реализации способа экспресс-диагностирования масла предложено измерительное устройство (рисунок 3), на которое получен патент RU 127479. Оно представляет собой металлический сосуд (ячейку), присоединенный к сливному патрубку трансформатора. Ячейка заполняется маслом, к изолированным электродам, имеющимся на крышке, присоединяют измерительный блок и проводят диагностирование масла.

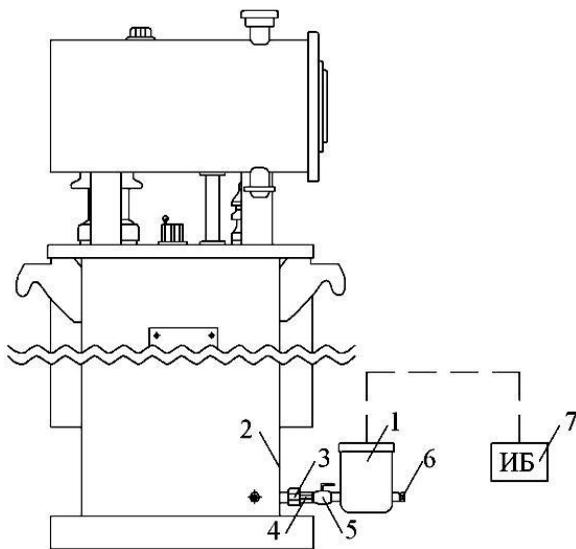


Рисунок 3 – Схема присоединения измерительной ячейки к трансформатору: 1 – измерительная ячейка; 2 – бак трансформатора; 3 – сливной патрубок; 4 – переходник; 5 – кран; 6 – пробка; 7 – измерительный блок

Реализуется разработанный способ следующим образом: бригада из электромонтеров выезжает на место размещения трансформатора и определяет 4 параметра масла (индекс влажности, удельное объемное сопротивление, прозрачность и внешний вид). Следует отметить, что такой способ позволяет исключить доставку проб масла в испытательную лабораторию.

Влажность масла оценивают в относительных единицах следующим образом. Образцы масла заливают в ячейки с многопластинчатыми конденсаторами, которые соединяют последовательно и подключают к переменному напряжению. Затем измеряют напряжения на них и определяют ИВ по формуле (2). Эталонный конденсатор заранее заполняют «сухим» маслом и герметизируют. При этом учитывается марка масла. Рабочий конденсатор размещают в измерительной ячейке. Такими ячейками снабжен каждый трансформатор, а измерительные приборы используют из комплекта электромонтеров. Заметим, что присоединение измерительной ячейки проводят на месте размещения трансформатора.

Для теоретического обоснования определения индекса влажности использована схема замещения, представленная на рисунке 4.

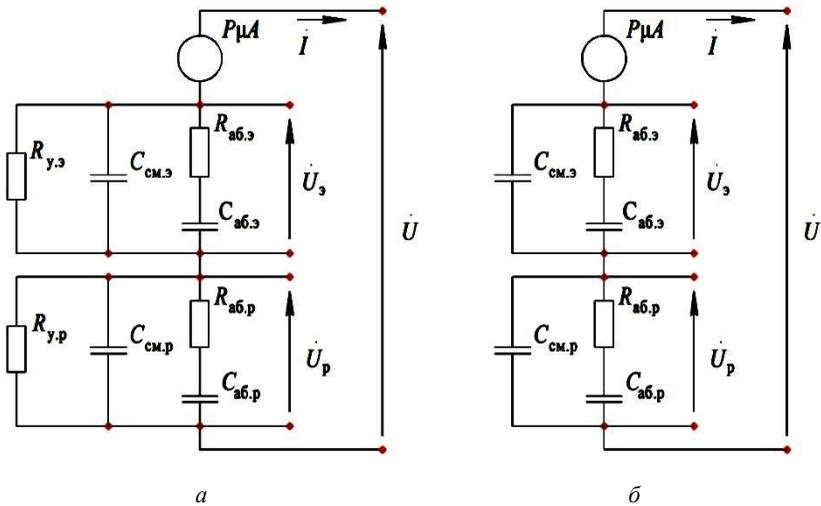


Рисунок 4 – Схема замещения электрических процессов в масле для измерения влажности в относительных единицах: *а* – полная; *б* – упрощенная:

- $C_{см.э}$, $C_{см.р}$ – емкости смещения на эталонной и рабочей ячейках;
- $C_{аб.э}$, $C_{аб.р}$ – емкости абсорбции на эталонной и рабочей ячейках;
- $R_{аб.э}$, $R_{аб.р}$ – сопротивления абсорбции на эталонной и рабочей ячейках;
- $R_{y.э}$, $R_{y.р}$ – сопротивления утечки на эталонной и рабочей ячейках;
- U – приложенное напряжение; $P\mu A$ – микроамперметр

С учетом обоснованного допущения, что $R_y \rightarrow \infty$, на рисунке 4, *б* показана упрощенная схема определения ИВ.

В общем случае каждая ячейка – это комплексное сопротивление эталонного $Z_э$ и рабочего $Z_р$ конденсаторов (рисунок 5).

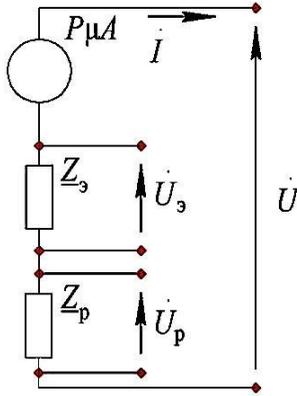


Рисунок 5 – Расчетная схема определения ИВ

Ток в цепи и напряжения на конденсаторах вычислим по уравнению:

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_p}, \\ \dot{U}_3 &= \frac{\dot{U} \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_p}, \\ \dot{U}_p &= \frac{\dot{U} \underline{Z}_p}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_p}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Полные комплексные сопротивления конденсаторов с учетом рисунка 5 примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_3 &= \frac{\underline{Z}_{см,э} \underline{Z}_{аб,э}}{\underline{Z}_{см,э} + \underline{Z}_{аб,э}}, \\ \underline{Z}_p &= \frac{\underline{Z}_{см,р} \underline{Z}_{аб,р}}{\underline{Z}_{см,р} + \underline{Z}_{аб,р}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\underline{Z}_{см,э}$, $\underline{Z}_{аб,э}$ – комплексные сопротивления цепей смещения и абсорбции эталонного конденсатора, Ом; $\underline{Z}_{см,р}$, $\underline{Z}_{аб,р}$ – комплексные сопротивления тех же цепей рабочего конденсатора, Ом.

Индекс влажности масла с учетом емкостей смещения и абсорбции определим по выражению:

$$\text{ИВ} = \frac{Z_{\text{см.э}} Z_{\text{аб.э}}}{Z_{\text{см.р}} Z_{\text{аб.р}}}. \quad (5)$$

Раскроем уравнения комплексных сопротивлений конденсаторов:

$$Z_{\text{см.э}} = \frac{1}{\omega C_{\text{см.э}}}, \quad Z_{\text{аб.э}} = \sqrt{R_{\text{аб.э}}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\text{аб.э}}}\right)^2}, \quad (6)$$

$$Z_{\text{см.р}} = \frac{1}{\omega C_{\text{см.р}}}, \quad Z_{\text{аб.р}} = \sqrt{R_{\text{аб.р}}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\text{аб.р}}}\right)^2}, \quad (7)$$

где ω – угловая частота, рад/с.

Подставив полученные значения в формулу (5), вычислим индекс влажности масла:

$$\text{ИВ} = \frac{C_{\text{см.р}} \sqrt{R_{\text{аб.э}}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\text{аб.э}}}\right)^2}}{C_{\text{см.э}} \sqrt{R_{\text{аб.р}}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\text{аб.р}}}\right)^2}}. \quad (8)$$

В теоретической части работы было показано, что для повышения чувствительности к измерению влаги и упрощения переносной аппаратуры измерения следует производить при частоте 50 Гц. В этом случае молекулы влаги не успевают поворачиваться вслед за электрическим полем на заметный угол, что позволяет принять $R_{\text{аб.э}} = R_{\text{аб.р}} = 0$.

Тогда уравнение (8) примет вид:

$$\text{ИВ} = \frac{C_{\text{см.р}} C_{\text{аб.р}}}{C_{\text{см.э}} C_{\text{аб.э}}}. \quad (9)$$

При использовании предлагаемого способа диагностирования масла следует соблюдать требование: эталонный и рабочий конденсаторы должны иметь одинаковые размеры. Это означает, что токи смещения в них равны, тогда можно принять $C_{\text{см.э}} = C_{\text{см.р}}$. В этом случае уравнение для расчета индекса влажности можно представить таким образом:

$$\text{ИВ} = \frac{C_{\text{аб.р.}}}{C_{\text{аб.э.}}} \quad (10)$$

Для упрощения расчета определены свойства абсорбционных емкостей и установлено, что индекс влажности зависит от диэлектрических проницаемостей эксплуатационного (рабочего) ϵ_p и «сухого» (эталонного) $\epsilon_э$ масел:

$$\text{ИВ} = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_э} \quad (11)$$

Среди многочисленных положений о диэлектрических свойствах дисперсных сред принято уравнение Пиекара, выведенное из условия аддитивности объемных весовых долей компонентов смеси. В соответствии с этим приращение диэлектрической проницаемости двухкомпонентной смеси (при появлении воды в масле) имеет вид:

$$\Delta\epsilon = \frac{W_B^* (\epsilon_B - \epsilon_M) (\epsilon_M + 2)}{\epsilon_B + 2 - W_B^* (\epsilon_B - \epsilon_M)}, \quad (12)$$

где W_B^* – доля воды в масле, г/т; ϵ_B , ϵ_M – диэлектрические проницаемости воды и масла соответственно.

Поскольку «сухое» масло $\epsilon_э = \epsilon_M$, а в связи со свойствами аддитивности рабочее $\epsilon_p = \epsilon_M + \Delta\epsilon$, получим окончательный вид уравнения:

$$\text{ИВ} = \frac{\epsilon_M + \Delta\epsilon}{\epsilon_M} = 1 + \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_M} \quad (13)$$

Подставив значения диэлектрических проницаемостей воды и масла из литературных источников в уравнение (13), выполним расчет индекса влажности (см. таблицу) для значений влаги в масле от 0 до 80 г/т.

Таблица – Теоретический расчет индекса влажности масла

ИВ, о.е.	Диэлектрическая проницаемость воды и масла	Количество воды в масле W_B^* , г/т								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
ИВ ₁	$\epsilon_B = 81,0$; $\epsilon_M = 2,1$	1	1,002	1,004	1,006	1,007	1,009	1,011	1,013	1,015
ИВ ₂	$\epsilon_B = 63,0$; $\epsilon_M = 2,4$	1	1,002	1,003	1,005	1,007	1,009	1,01	1,012	1,014

По результатам расчета в таблице построен график (рисунок 6).

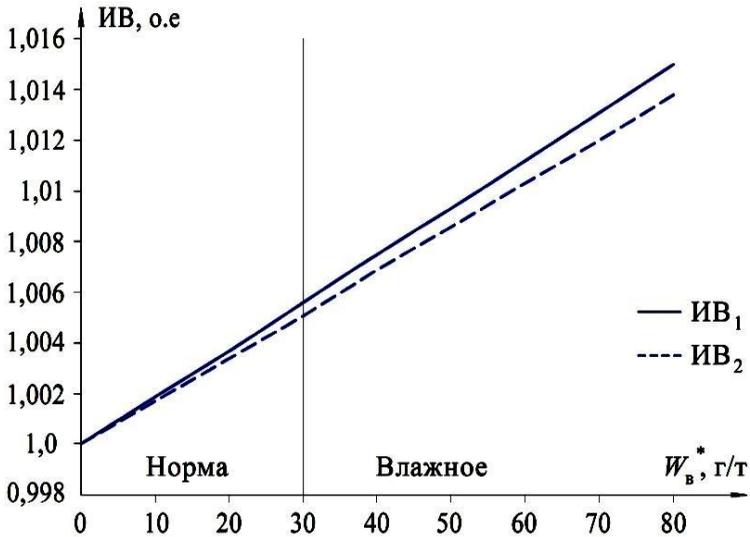


Рисунок 6 – Зависимость ИВ от абсолютной влажности масла

Приведенный график подтверждает увеличение индекса влажности с ростом $W_{в}^*$. Эти данные имеют некоторые усредненные значения. В конкретных случаях необходимо учитывать марку масла, его диэлектрические характеристики и температуру смеси, что возможно сделать при экспериментальном исследовании.

Согласно ПТЭЭП, количество воды в масле трансформаторов не должно превышать 30 г/т. Таким образом, если ИВ составляет 1,0–1,005 о.е., то масло считается «сухим», т.е. влаги в нем менее 30 г/т; если ИВ > 1,005 о.е. – влажным. Следовательно, необходимо проводить лабораторный анализ масла и профилактические мероприятия по восстановлению его свойств.

В **третьей главе** «Экспериментальные исследования способа экспресс-диагностирования масла» представлены типовые и разработанные методики проведения испытаний в лабораторных и производственных условиях, а также выполнен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов. Производственные испытания опытного образца измерительной ячейки были проведены в Питерских РЭС Саратовской области.

Для проверки электрофизических параметров масла была собрана экспериментальная установка (рисунок 7).

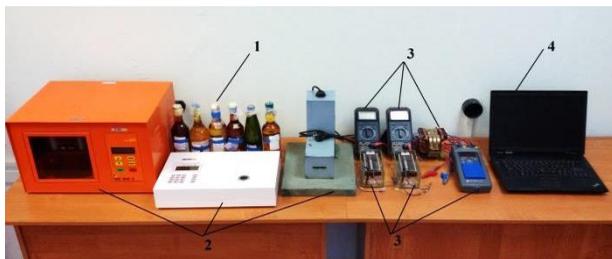


Рисунок 7 – Экспериментальная установка: 1 – набор проб масла; 2 – комплект для типовых испытаний (СКАТ-М100; ТАНГЕНС-3М; прибор для установления наличия взвешенного углерода); 3 – комплект для исследовательских испытаний (многопластинчатые конденсаторы; мультиметры, понижающий трансформатор, мегаомметр); 4 – персональная ЭВМ

Экспериментальная установка позволяет определить: пробивное напряжение, диэлектрические потери, наличие взвешенного углерода, индекс влажности, удельное объемное сопротивление, прозрачность и внешний вид масла.

Измерения температуры вспышки, кислотного числа, класса чистоты и влажности масла проведены в химической лаборатории Центрального ПО филиала ПАО «МРСК Волги» – «Саратовские РС».

Для производственных и лабораторных испытаний изготовлены измерительные ячейки. Конструкция ячейки может иметь различное исполнение. Один из вариантов показан на рисунке 8.

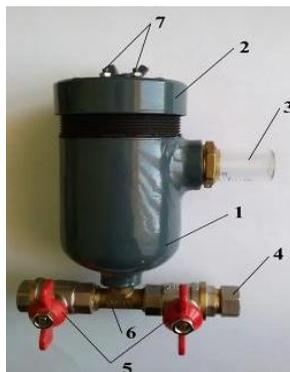


Рисунок 8 – Образец измерительной ячейки для производственных испытаний: 1 – корпус измерительной ячейки; 2 – крышка; 3 – колба для определения внешнего вида и цвета масла; 4 – заглушка; 5 – краны; 6 – тройник; 7 – выводы

По результатам статистического анализа протоколов испытательной лаборатории, проведенного ранее, установлены интегральные свойства влажности масла из трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ как главного диагностического параметра. Повторные испытания проходили с использованием экспериментальной установки. С этой целью из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ были взяты 15 проб масла, имеющих различную влажность (от 11 до 80 г/т). Результаты испытаний, представленные на рисунке 9, совпадают с данными, полученными при диагностировании масла из трансформаторов высокого класса напряжения (35 и 110 кВ), т.е. подтверждают, что влажность масла является интегральным диагностическим параметром.

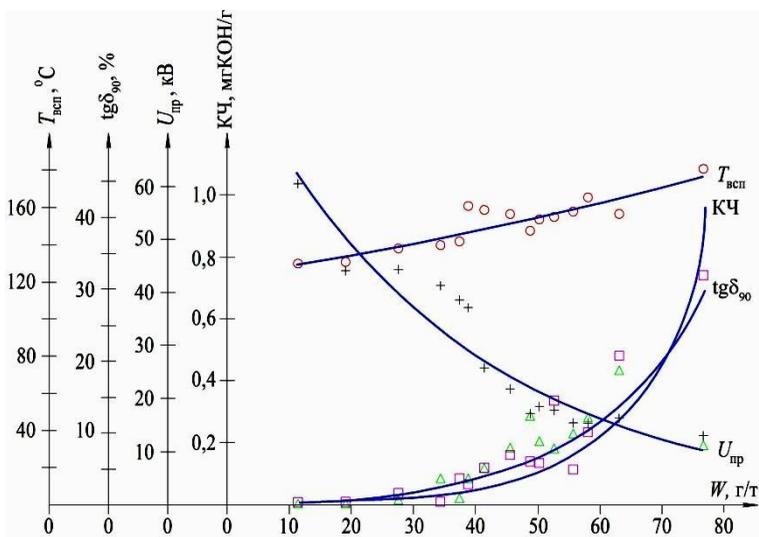


Рисунок 9 – Результаты испытания масла из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ

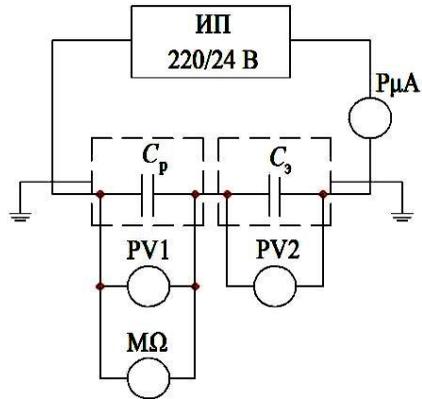
При проведении лабораторных испытаний исследованы многопластинчатые конденсаторы – эталонный и рабочий (рисунок 10), размещенные в отдельных изолированных корпусах. В каждом конденсаторе находится по 37 пластин с зазором 1,91 мм. В рабочем конденсаторе диэлектриком служит испытуемое масло, а в эталонном – заведомо «сухое» масло той же марки, что и в рабочем.



Рисунок 10 – Рабочий и эталонный конденсаторы для лабораторных исследований

Измерения проведены по схеме, представленной на рисунке 11, на переменном напряжении от отдельного трансформатора (220/24 В). Перед началом измерения схему уравнивали по величинам емкости конденсаторов. Затем в ячейку эталонного конденсатора заливали «сухое», а рабочего – испытуемое масло. При этом контролировали отсутствие пузырьков воздуха и превышение уровня масла над пластинами (не выше 15 мм). После отстоя масла в течение 5 мин к конденсаторам, соединенным последовательно, подводили напряжение, которое измеряли с 2-кратной повторностью.

Рисунок 11 – Принципиальная схема измерения индекса влажности и удельного объемного сопротивления:
 ИП – источник питания;
 C_3 – ячейка с «сухим» маслом;
 C_p – ячейка с эксплуатационным маслом;
 PV – вольтметр;
 P μ A – микроамперметр;
 M Ω – мегаомметр



После определения индекса влажности измеряют удельное объемное сопротивление масла. Для этого к выводам конденсатора с испытуемым маслом подключают мегаомметр так, как показано на рисунке 11. Выставляют испытательное напряжение (2500 В) и проводят измерения. Через 60 с фиксируют полученное значение. Рассчитывают удельное объемное сопротивление (Ом·м), которое должно быть не менее 100 ГОм·м:

$$\rho_v = 0,113C_0R_v \cdot 10^{l^2}, \quad (14)$$

где C_0 – емкость пустой измерительной ячейки, Ф; R_v – измеренное значение объемного сопротивления, Ом.

Затем определяют прозрачность масла. Для этого испытуемое масло наливают в стеклянную емкость, которую помещают в прибор для установления наличия взвешенного углерода. Оценивают качество масла по следующим трем группам: I – видны все три линии – масло может быть оставлено в эксплуатации; II – линия 0,5 мм видна нечетко – масло должно быть очищено; III – линия 0,5 мм не видна – масло должно быть заменено либо подвергнуто регенерации.

В заключение определяют внешний вид масла. Оно может соответствовать норме, быть мутным, с осадками и взвешенными частицами различных загрязнений. Определяют его визуально. Внешний вид масла не является решающим параметром для браковки, однако дает полезную информацию о необходимости его дальнейших испытаний.

Экспериментальная кривая зависимости индекса влажности от абсолютной влажности масла показана на рисунке 12. Там же построена кривая теоретической (расчетной) зависимости, полученной по формуле (13).

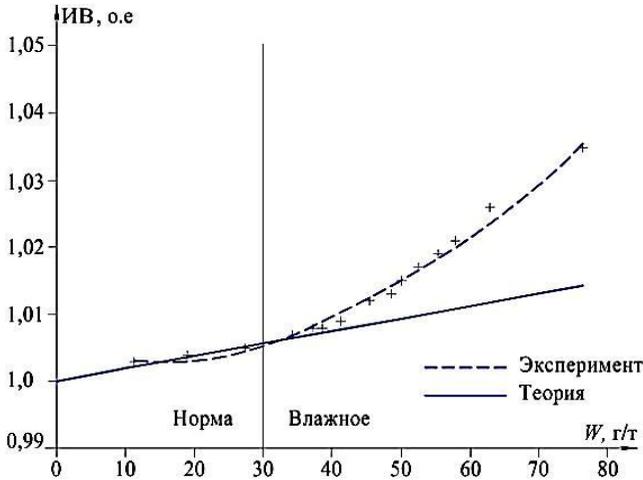


Рисунок 12 – Экспериментальная и теоретическая зависимости ИВ от абсолютной влажности масла

Как видно из рисунка 12, максимальная погрешность изменения индекса влажности в диапазоне значений абсолютной влажности от 11 до 80 г/г не превышает 3 %.

В четвертой главе «Оценка экономической эффективности применения разработанного способа экспресс-диагностирования масла» рассчитаны разовые капиталовложения на изготовление измерительной ячейки и годовой экономический эффект.

Использование разработанного способа (по сравнению с типовым) позволило снизить трудовые затраты на диагностирование масла на 37,2 %. Годовой экономический эффект от реализации способа экспресс-диагностирования масла из одного трансформатора составил 1564,5 руб. Срок окупаемости – 2,1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная техническая задача – обеспечение сохранения работоспособности трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, отработавших нормативный срок службы, путем использования разработанного способа экспресс-диагностирования масла. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать основные выводы:

1. Анализ системы электроснабжения сельского хозяйства Саратовской области показал, что около 60 % трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ отработали нормативный срок службы. Все они размещены на большой территории и в среднем удалены от центра технического обслуживания на 70 км и более, что затрудняет проведение профилактических мероприятий. В результате ежегодно около 10 % таких трансформаторов выходят из строя, что нарушает бесперебойность электроснабжения сельских потребителей.

2. Установлено, что около 50 % отказов связано с ухудшением состояния изоляции, вызываемым главным образом старением масла. Ключевым фактором старения служит появление в масле влаги. Увеличение ее на 0,01 % приводит к уменьшению пробивного напряжения в среднем на 10–20 кВ.

3. Графически доказано, что ежегодное диагностирование масла позволяет уменьшить число отказов трансформаторов, отработавших нормативный срок службы.

4. Статистический анализ 700 протоколов по испытанию проб масла из трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ, выполненный в сокращенном объеме, позволил установить, что влажность масла связана с его основными параметрами: пробивным напряжением, диэлектрическими потерями, кислотным числом, температурой вспышки, т.е. является его интегральным диагностическим параметром.

5. Обоснован главный диагностический параметр – индекс влажности, определены его нормативные значения. Установлена аналитическая связь между индексом влажности и абсолютной долей влаги в масле в диапазоне от 0 до 80 г/т. В качестве вспомогательных параметров предложены: удельное объемное сопротивление, прозрачность и внешний вид масла.

6. Совершенствование эксплуатации трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ состоит в переходе к диагностированию масла на месте их размещения с помощью измерительной ячейки (патент RU 127479). Разработана методика реализации предложенного способа диагностирования.

7. Экспериментально доказаны интегральные свойства влажности масла, отобранного из трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ, как главного диагностического параметра. Результаты лабораторных исследований подтвердили, что расчетные и экспериментальные данные, полученные при определении индекса влажности масла, совпадают с его абсолютной влажностью. Относительная максимальная погрешность ИВ в диапазоне значений абсолютной влажности от 11 до 80 г/т не превышает 3 %.

8. Производственные испытания доказали возможность диагностирования масла с помощью предложенной измерительной ячейки. Приведена форма протокола для реализации разработанного способа экспресс-диагностирования масла.

9. Экономическая эффективность разработанного способа экспресс-диагностирования масла достигается снижением трудовых и финансовых затрат. Годовой экономический эффект от его реализации в рамках одних РЭС составил 281610 руб. Срок окупаемости разовых капиталовложений – 2,1 года.

Рекомендации. Полученные результаты могут быть использованы конструкторскими организациями и эксплуатационными службами при создании и модернизации трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ путем установки на них измерительной ячейки для диагностирования масла, а также в учебном процессе для преподавания студентам дисциплины «Наладка и испытание электро- и энергооборудования».

Перспективы дальнейшей разработки темы: расширение области применения и повышение эффективности разработанного измерительного оборудования для диагностирования масла, объединение его в единый измерительный комплекс. Разработка мобильного варианта устройства.

**Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:**

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Шлюпиков, С. В.** Корректирование периодичности ТО и ТР электрооборудования сельскохозяйственного производственного участка / Г. П. Ерошенко, С. М. Бакиров, С. В. Шлюпиков // Научное обозрение. – 2011. – Вып. 6. – С. 14–21.

2. **Шлюпиков, С. В.** Определение влажности жидких диэлектриков / А. А. Мадеев, Г. П. Ерошенко, С. В. Шлюпиков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2013. – Вып. 8. – С. 57–59.

3. **Шлюпиков, С. В.** Особенности эксплуатации электрооборудования с отработавшим нормативным ресурсом / Ерошенко Г. П., Шлюпиков С. В. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – Вып. 1. – С. 27–28.

Патент

4. **Пат. на полезную модель № 127479** Российская Федерация, МПК G 01 R 27/00 (2006.01). Устройство контроля качества масла / Ерошенко Г. П., Трушкин В. А., Шлюпиков С. В. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». (RU). – № 2012133106/28 ; заявл. 01.08.2012 ; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. – 6 с.

В других изданиях

5. **Шлюпиков, С. В.** Особенности эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве / С. В. Шлюпиков, В. А. Трушкин // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : КУБиК, 2010. – С. 383–385.

6. **Шлюпиков, С. В.** Диагностирование трансформаторного масла / С. В. Шлюпиков, В. А. Трушкин // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : КУБиК, 2011. – С. 314–315.

7. **Шлюпиков, С. В.** Использование диагностических параметров трансформаторного масла для оценки состояния силового трансформатора / В. А. Трушкин, С. В. Шлюпиков // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : КУБиК, 2012. – С. 255–259.

8. **Шлюпиков, С. В.** Особенности диагностирования электрооборудования сельскохозяйственных производственных участков / С. М. Бакиров, С. В. Шлюпиков // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : КУБиК, 2012. – С. 34–36.

9. **Шлюпиков, С. В.** Факторы, влияющие на старение трансформаторного масла / В. А. Трушкин, С. В. Шлюпиков // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : КУБиК, 2013. – С. 320–322.

10. **Шлюпиков, С. В.** Диагностические признаки трансформаторного масла / Г. П. Ерошенко, В. А. Трушкин, С. В. Шлюпиков // Интеграция науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Победы в Сталинградской битве / ФГБОУ ВПО «Волгоградский ГАУ». – Волгоград, 2013. – Т. 2. – С. 275–277.

11. **Шлюпиков, С. В.** Связь электрической прочности с влажностью и взвешенными частицами в трансформаторном масле / В. А. Трушкин, С. В. Шлюпиков // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В. А. Трушкина. – Саратов : Буква, 2014. – С. 313–316.

12. **Шлюпиков, С. В.** Необходимость повышения эксплуатационной надежности трансформаторных подстанций / В. А. Трушкин, С. В. Шлюпиков, С. А. Кифарак // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. А. Трушкина. – Саратов : ООО «ЦеСАин», 2015. – С. 295–297.

Подписано в печать 15.03.16

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 5

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в ООО «Издательский дом "Вариа"»,

410076, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 120А.

Тел.: (8452) 24-95-70, 23-32-76. e-mail: poligrafstan@yandex.ru