

УДК 69

DOI 10.21661/r-554211

Охрименко А.И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

***Аннотация:** в статье речь пойдет о проблемах использования минерального трансформаторного масла как нефтепродукта, соответственно, цель исследования – выбор способа решения данных проблем: либо путем использования растительного трансформаторного масла, изготовленного из различных растительных культур, содержащих природное растительное масло (семена рапса, подсолнуха, сои), которое при добавлении специальных компонентов (изоляторы и антиокислители), может использоваться в качестве трансформаторного, либо комбинированного использования трансформаторного минерального масла и растительного масла.*

***Ключевые слова:** минеральное трансформаторное масло, растительное трансформаторное масло, комбинированная масляная смесь, биodeградация, современный парк трансформаторов.*

В начале – несколько слов об использовании минерального трансформаторного масла (далее – ТММ). Во всех современных маслonaполненных высоковольтных аппаратах масло используется как основной диэлектрик для повышения электрической прочности, является теплоотводящей и изолирующей средой, а в высоковольтных масляных выключателях масло выполняют дугогасящую функцию. В последнее время в силовых трансформаторах, напряжением до 220 кВт включительно, чаще всего используют ТММ марки ТСП. Величина некоторых показателей и общее состояние трансформаторного масла характеризуют изменение режима работы аппаратов и их исправность.

Например, при повреждении межлистовой изоляции стали сердечника местный нагрев стали вызывает снижение температуры вспышки масла, а электрическая дуга, возникшая при каком-либо коротком замыкании внутри бака, приводит к разложению масла, выделению газов и падению температуры вспышки.

Высокая температура масла свидетельствует о перегрузке трансформатора или неисправности системы охлаждения [5].

Говоря о проблемах использования трансформаторного масла, необходимо сказать, что ТММ – горючий, взрывоопасный и биологически трудноразложимый продукт.

Практически с начала использования ТММ в 90-е годы XIX в. начались взрывы и пожары на трансформаторах. В последние десятилетия XX в. проблемы безопасности осложнились всё возрастающими экологическими требованиями, связанными с трудностями утилизации ТММ из-за его низкой биологической разложимости. В настоящее время, например, в силовых трансформаторах по всему миру используется 3–4 млрд. л ТММ. По данным ОАО «Холдинг МРСК» только на подстанциях 6–10/0,4 кВ до 2025 г. необходимо заменить около 290 тыс. силовых трансформаторов [6].

Международная электротехническая комиссия рекомендует при реконструкции объектов, осуществлять перевод сетей на более высокий класс напряжения, с приближением трансформаторных подстанций к потребителю. Это обуславливает необходимость создания безопасного и экологически чистого оборудования нового поколения. Существует проблема продления «времени жизни» трансформаторов с истекшим сроком службы, которая решается их перезаливкой, для чего также необходимы жидкости нового типа.

Проблема замены минерального трансформаторного масла только на первый взгляд кажется простой. Критика недостатков несложное занятие. Несмотря на свои недостатки ТММ используется в электротехнике, достаточно давно и эффективно. Есть ли реальная альтернатива использованию ТММ?

1) Использование в электротехнике синтетических жидкостей на основе полихлордифенилов (совтол, аскарели). В данное время находятся под запретом к применению из-за высокой токсичности и низкой биodeградационной способности.

2) Жидкости на основе эфира пентаэретрита и синтетических жирных кислот (ПЭТ) типа Midel 7131, кремнийорганические жидкости являются менее

горючими по сравнению с ТММ, однако в процессе старения наблюдается резкий рост вредных соединений, возникновение желатина из-за окисления свинца, олова и пр. Стоимость этих жидкостей существенно больше, чем ТММ, а их производство является вредным.

3) Перфторуглеродные жидкости (ПФУЖ) типа фожалин, БАФ и др. являются полностью негорючими (класс L по классификации МЭК). Использование ПФУЖ, синтезированных в 50-е годы прошлого столетия, ограничилось специальными малогабаритными устройствами силовой радиоэлектроники из-за их очень высокой стоимости.

Например, замена ТММ на ПФУЖ, например, в малогабаритном трансформаторе ОАО «Электrozавод» типа ТМГ-100/10-У 1 привела бы к его удорожанию с 95 тыс. руб. до 5,5 млн. руб., т.е. почти в 60 раз.

4) Что касается концепции некоторых авторов о замене жидкой изоляции на электрогазовую или твёрдую. Эффективность использования подобной изоляции в трансформаторах крайне низка (например, допустимая длительности перегрузок аппаратов с такой изоляцией минимальна).

Реальной альтернативой выступает внедрение в качестве охлаждающей и изолирующей среды в трансформаторах находят жидкие изоляционные композиции на основе возобновляемого растительного сырья.

В западной литературе для названия таких композиций наиболее широко используется словосочетание «natural esters» (природные эфиры). Одним из первых был выдан патент на новую изоляционную композицию в США в 1998 г [8], а в 1999 г. – на трансформатор с такой композицией [9].

После этого появились десятки патентов, сообщений об исследованиях и применении таких композиций преимущественно в силовых распределительных трансформаторах. Создали и выпустили на рынок трансформаторное растительное масло (далее – ТРМ) и трансформаторы с этой изоляцией: «Cooper Power Systems» (США) – композиция «Envirotemp FR 3» на основе рапсовых семян (патент 1999 г.); «ABB Power T&D Company Inc.» (США) – композиция «BIOTEMP» на основе семян подсолнечника и сои (патент 1999 г.); «M&I MATERIALS»

(Англия) – «Midel®eN» на основе рапсовых семян. Фирмы «Siemens», «Merlin Gerin», «Schneider Electric», «AREVA» и др. также ведут работы в этом направлении.

В данной статье можно упомянуть Проект CEMIG Исследования и разработки (Бразилия) в области передачи и распределения электроэнергии в сотрудничестве с ABB, мировым лидером по производству оборудования для электрических сетей. Целью проекта, который не имеет аналогов в мире, было заполнить трансформатор на 100% растительным маслом в сочетании с Nomex, изоляцией последнего поколения, которая обеспечивает силовым трансформаторам коэффициент усиления до 40%.

Есть сообщения о разработке, изготовлении и поставке фирмой «AREVA» распределительных трансформаторов на 132 кВ, 90 МВ-А с объёмом ТРМ порядка 30 т, шунтирующего реактора на 245 кВ, 22 МВ-А, с изоляцией ТРМ типа Envirottemp FR,3 и др. По оценкам экспертов, к настоящему времени в мире находится в эксплуатации несколько десятков тысяч «зелёных» трансформаторов с ТРМ [6].

В таблице 1 приведены основные параметры ТММ и ТРМ, их сравнительная характеристика и заключение о преимуществе использования того или другого трансформаторного масла.

Таблица 1

Сравнительные свойства минерального
и растительного трансформаторного масла, их смеси

Показатели	ТММ	ТРМ	Смесь	Преимущества технологического, экономического и экологического характера
Температура вспышки, °С	135	300–320	220	Снижение вероятности пожара и взрыва, возможность увеличения нагрузочной способности при использовании ТРМ
Температура воспламенения, °С	160–165	360–370	300	
Температура застывания, °С	45–50	-25–30	-40	Возможность использования ТММ в зимнее время на Крайнем Севере
Кинематическая вязкость, сСт, при 20°С 100°С	28–30 2,3–2,5	80–85 2–15	50 2–10	Более высокая кинематическая вязкость и плотность создает дополнительные расходы при транспортировке и хранении ТРМ

Плотность, кг/м ³	800–900	920	850–920	
Коэффициент объемного расширения, 10 ⁻⁴ , град ⁻¹	7–9	5–7	6–8	При хранении ТРМ возникает меньше потерь вследствие «малого» и «большого» дыхания
Коэффициент теплопроводности, Дж/м·с·град	0,15	0,17	0,16	ТММ более подходящая охлаждающая среда
Удельная теплоемкость, Дж/г·град	1,7–2,3	2–2,3	1,9–2,2	
Поверхностное натяжение, Н/м	34–48	25	29–34	
Кислотное число, мг КОН/г	0,01–0,02	0,03–0,1	0,03	Более высокое кислотное число создает дополнительные затраты на введение антиокислительных присадок для ТРМ
Гигроскопичность, ppm	0,2–0,3	1–2	0,3–1,5	Более высокая гигроскопичность ТРМ, способствующая уменьшению влагосодержания в твёрдой изоляции, уменьшению потерь, увеличение срока службы изоляции, поскольку трансформаторы с высоким влагосодержанием не могут выдерживать нагрузки без риска.
Пробивное напряжение [МЭК 60156], кВ	70	65	67	
Удельное сопротивление Ом/м	2·10 ¹⁴	2·10 ¹⁵	5·10 ¹⁴	
Диэлектрическая проницаемость	2,2–2,3	2,8–3,1	2,2–2,8	
Газообразование под воздушным ЧР, ppm: Н ₂ СО ₂	9000 1000	6000 100	7000 500	У ТММ значительно выше, что создает дополнительные расходы и повышенную взрывоопасность
Способность к биодеградации, ч/21 день	30%	100%	50%	Высокая экологическая чистота, снижение расходов на утилизацию ТРМ

Кроме этого, использование ТРМ имеет следующие плюсы:

- 1) практически неограниченные запасы сырья, возможность использования генно-модифицированных растений, снижение стоимости при увеличении производства до уровня стоимости ТММ;
- 2) возможность вторичного использования отработанного ТРМ (для биодизеля, лаков и красок);

3) отсутствие вредного влияния на здоровье персонала;

4) существенное уменьшение размеров трансформатора благодаря новым компоновочным решениям, экономия площадей, занимаемых трансформаторами на подстанциях и т. д.

В то же время при использовании ТММ, показатели тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) или тангенса дельта (IEEE) [6] как важная электротехническая характеристика, значительно ниже. Более низкое значение данного показателя, который определяется как отношение активной составляющей тока утечки через изоляцию к его реактивной составляющей, говорит о более высокой эффективности использования ТММ, в связи с меньшими затратами, поскольку уровень изоляции – основной показатель надежности функционирования силовых трансформаторов, и другого оборудования высокого напряжения. Высоковольтные вводы и кабели с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь изоляции при высокой температуре могут получить повреждения из-за «теплового пробоя». У ТММ тангенс угла потерь составляет при 25°C – 0,0001–0,0003, при 90°C – 0,005–0,022; у ТРМ, соответственно – 0,0005–0,004 и 0,018–0,06 [8].

Использование ТММ экономически и технологически обосновано, обладает прекрасными диэлектрическими свойствами, стабильностью против окисления, совместимостью с целлюлозной изоляцией при относительно низкой цене. Вместе с тем, как уже было отмечено к ТММ есть ряд претензий по эксплуатационной и экологической безопасности [2].

В заключение хотелось бы сказать, что несмотря на многочисленные плюсы ТРМ, достаточную «пропиаренность» ТММ на Западе, широкого промышленного использования ТРМ как в России, так и в других странах в данное время не наблюдается. Это объясняется, как видится, следующими причинами:

1) Себестоимость, а, следовательно, и цена на рынке ТММ ниже, чем ТРМ;

2) Система производства, использования ТММ отработана годами, задействованы сотни предприятий, десятки тысяч специалистов и рабочих, технологий и мощностей;

3) У ТММ есть собственные преимущества, о которых было сказано выше, например, возможность использования в условиях реальной русской зимы.

Есть ли выход? Представляется, что решение всех вышеуказанных проблем заключается в комбинированном использовании ТММ и ТРМ тем более, что действующий парк трансформаторов позволяет использовать ТРМ как в чистом, так и смешанном виде.

Смешение растительного масла с ТММ в пропорции не более 1:1 позволяет:

1) без добавления специальных присадок использовать эту смесь в качестве трансформаторного масла, что повышает экономическую эффективность

2) повысить свойства ТММ, в тоже время ТРМ, а также безопасность при обслуживании ТММ;

Эту смесь можно назвать комбинированная масляная смесь (КМС) и определить пропорции соотношения растительного масла в ТММ от 10 до 50%. Использовать же смесь ТРМ и ТММ можно в любых пропорциях без ограничений. Также растительным маслом можно «омолаживать», то есть улучшать ТММ бывшее в употреблении.

В основах государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 года, сказано, что одним из механизмов роста экологически ориентированной экономики является внедрение инновационных ресурсосберегающих, экологически безопасных и эффективных технологий на базе единой технологической платформы с активным участием государства, бизнеса, науки и образования, общественных организаций [5].

Представляется, что на уровне Правительства России в программе социально-экономического развития РФ, необходимо указать в качестве одного из приоритетов в сфере развития промышленности использование растительных, биоразлагающих компонентов, оказание мер материального стимулирования (путем налоговых льгот, грантов и др.) предприятий, использующих данные компоненты.

Также, можно предложить сделать из Иркутской области «пилотный» регион, не забывая о том, что большинство промышленных предприятий находятся

на Байкальской природной территории, где стимулировать использование данных экологически чистых компонентов не только и не столько за счет средств федерального и регионального бюджета, сколько за счет экологических, природоохранных фондов регионального, национального и международного уровня. Учитывая, что предприятия, осуществляющие свою деятельность в пределах Байкальской природной территории, должны проходить обязательную экологическую экспертизу [4], закрепить в законодательстве норму, согласно которой, предприятия, применяющие инновационные экотехнологии, проходят экспертизу в упрощенном порядке.

Список литературы

1. Аникеева Н.А. Исследование характеристик растительных масел для высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Н.А. Аникеева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com>. (дата обращения 09.03.2021).
2. Аникеева М.А. Исследование растворимости газов в рапсовом масле как электроизоляционном материале / М.А. Аникеева, С.М. Коробейников // Теплофизика высоких температур. 2020. – Т. 54, №1
3. Менахин Л.П. Новые типы трансформаторов с экологически чистыми нетоксичными с повышенной взрыво- пожаробезопасностью жидкими композициями на основе возобновляемого растительного сырья / Л.П. Менахин, А.Л. Панин, Ю.В. Торшин, В.А. Шарковский // VII Междунар. научно-техн. конф. «Силовые трансформаторы и системы диагностики». – М., 2010.
4. Об охране озера Байкал: федер. Закон РФ от 1 мая 1999 г. №94-ФЗ // Рос. газ. – 1999. – 7 мая; 2016. – 23 нояб.
5. Основы государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 г.: указ Президента РФ от 30 апр. 2012 г. // Рос. Газ. – 2012. – 6 мая.

6. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Издание шестое с изменениями и дополнениями – М.:НЦ ЭНАС, 2004 [Электронный ресурс] – URL: <https://www.etlpro.ru/articles/html/04/> (дата обращения 15 мая 2021 г.).

7. Торшин Ю.В. Создание и применение изоляционных масел на основе возобновляемого растительного сырья / Ю.В. Торшин, В.А. Шарковский // Электротехника. – 2011. – №9. – С. 46–53 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.transform.ru/production/prod00011.article/> (дата обращения 15.03.2021).

8. M. Karlstrom, M. Ohlen, P. Werelius, Company MEGGER Ltd. Частотная характеристика диэлектрика и зависимость тангенса дельта от температуры [Электронный ресурс] – URL: <https://www.electropergam.ru>. (дата обращения 21 мая 2021 г.).

9. Pat. 576451» l»S. Ds'rectric Fluid for use in Power Distribution Equipment G Goedde. G.Gauger. J.Lapp, A. Yerges. June 16. 1999 [Электронный ресурс] – URL:<https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/>.(дата обращения 21 мая 2021 г.).

10. Pat. 584901» US. Electrical Transformers Containing Electrical Insulation Fluid Comprising High Oleic Acid Oil Compositions T. Oommen. C.Clibome. September 7, 1999 [Электронный ресурс] URL:<https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/>. (дата обращения 21 мая 2021 г.).

Охрименко Александр Иванович – магистрант, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный технический университет», Иркутск, Россия.
