

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-132-141>

УДК 621.314.212:621.315.615

Электрофизические свойства смесей минерального масла и синтетической сложноэфирной диэлектрической жидкости

Лютикова М. Н.^{1*}, Коробейников С. М.¹, Коновалов А. А.²

¹ ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

пр. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия

² ПАО «Россети»

ул. Беловежская, 4, 121353, г. Москва, Россия

Поступила / Received 06.03.2021

Принята к печати / Accepted for publication 23.04.2021

Силовые трансформаторы являются ключевым оборудованием в системах генерации, передачи и распределения электроэнергии. Надежность работы силовых трансформаторов базируется на работоспособности изоляционной системы, которая включает в себя твердую целлюлозную изоляцию и жидкий диэлектрик. Современная энергетика требует от жидкой изоляции превосходные изоляционные свойства, высокие огнестойкие свойства и способность к биологическому разложению. Минеральное масло, которое используется более 100 лет, не отвечает некоторым требованиям. Поэтому в настоящее время рассматриваются различные способы усиления изоляционных свойств масла, в том числе путем смешения его с другими жидкими диэлектриками, обладающими улучшенными свойствами. В качестве таких альтернативных жидкостей рассматриваются синтетические и натуральные эфиры.

Рассмотрена возможность усиления изоляционных характеристик минерального масла с высоким содержанием ароматических углеводородов (на примере масла марки Т-750) путем смешения его с синтетическим сложным эфиром Midel 7131. Приведена оценка изоляционных параметров полученных смесей с долей эфира в минеральном масле от 0% до 50%. Описываются основные характеристики смесей, такие, как плотность, кинематическая вязкость, температура вспышки, тангенс угла диэлектрических потерь, относительная диэлектрическая проницаемость, пробивное напряжение и влагосодержание. Показано, что с повышением доли эфира одни параметры полученной изоляционной жидкости улучшаются (температура вспышки, диэлектрическая проницаемость, пробивное напряжение), а другие показатели (плотность, кинематическая вязкость, тангенс угла диэлектрических потерь) при содержании эфира более 10% в смеси не соответствуют требованиям, предъявляемым к минеральным маслам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральное изоляционное масло, синтетический эфир, электрофизические свойства, пробивное напряжение, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, температура вспышки, вязкость, плотность

Адрес для переписки:

Лютикова М. Н.
ФГБОУ ВО «НГТУ», кафедра Безопасность труда
пр. К. Маркса, 20, 630073, Россия
e-mail: m.lyutikova@mail.ru

Address for correspondence:

Lyutikova M. N.
Novosibirsk State Technical University
K. Marxa str., 20, 630073, Novosibirsk, Russia
e-mail: m.lyutikova@mail.ru

Для цитирования:

Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Коновалов А. А. Электрофизические свойства смесей минерального масла и синтетической сложноэфирной диэлектрической жидкости. Надежность и безопасность энергетики. 2021. – Т. 14, №2. – С. 132 – 141.

<https://doi.org/10.24223/999-5555-2021-14-2-132-141>

For citation:

Lyutikova M. N., Korobeynikov S. M., Konovalov A. A. [Electro-physical properties of mixtures of mineral oil and synthetic ester dielectric liquid]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2021, vol. 14, no. 2, pp. 132 – 141. (in Russian)

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-132-141>

Electrophysical properties of mixtures of mineral oil and synthetic ester dielectric liquid

Lyutikova M. N.^{1*}, Korobeynikov S. M.¹, Konovalov A. A.²

¹ Novosibirsk State Technical University
K. Marxa str., 20, 630073, Novosibirsk, Russia

² PJSC «Rosseti»
Belovezhskaya str., 4, 121353, Moscow, Russia

Power transformers are key equipment in power generation, transmission, and distribution systems. The reliability of power transformers is based on the performance of the insulation system, which includes solid cellulose insulation and a liquid dielectric. Modern power engineering requires liquid insulation to have excellent insulating properties, high fire resistance, and biodegradability. Mineral oil that has been in use for over 100 years does not meet certain requirements. Therefore, various methods of enhancing the insulating properties of the oil are currently being considered, including mixing it with other liquid dielectrics, which have excellent properties. Synthetic and natural esters are considered as alternative fluids.

This article discusses the possibility of enhancing the insulating characteristics of mineral oil with a high content of aromatic hydrocarbons (for example, T-750 oil) by mixing it with synthetic ester Midel 7131. Assessment is given of insulating parameters of the resulting mixtures with an ester fraction in mineral oil from 0% to fifty%. The main characteristics of the mixtures are described, such as density, kinematic viscosity, flash point, dielectric loss tangent, relative dielectric permittivity, breakdown voltage, and moisture content. It is shown that with an increase in the proportion of ester, some parameters of the obtained insulating liquid improve (flash point, dielectric constant, breakdown voltage), while values of other parameters (density, kinematic viscosity, dielectric loss tangent) with an ester content of more than 10% in the mixture do not meet the requirements for mineral oils.

KEYWORDS: mineral insulating oil, synthetic ester, electrophysical properties, breakdown voltage, dielectric loss, dielectric permittivity, flash point, viscosity, density

Роботизация производства, массовая компьютеризация, а также активное внедрение цифровых технологий во многие аспекты современной жизни требуют большого потребления электрической энергии, а следовательно, на энергетические компании возлагается высокая ответственность за обеспечение бесперебойного электроснабжения. Осуществление надежного электроснабжения зависит, в том числе, от работоспособности главных компонентов электрической цепи — силовых трансформаторов. Надежная работа силового трансформатора в первую очередь основана на исправном состоянии изоляционной системы, представляющей собой комплекс из твердой целлюлозной изоляции и трансформаторного масла.

До настоящего времени минеральные масла оставались наиболее успешными диэлектриками для силовых трансформаторов во всем мире. Однако по причине недостаточной стойкости к окислению в процессе эксплуатации, низкой огнестойкости и способности к биологическому разложению с каждым годом все активнее рассматриваются способы улучшения характеристик минерального масла [1, 2]. Всесторонне изучается оптимизация изоляционных свойств минерального масла путем внесения определенных присадок [3], наночастиц некоторых химических соединений [4–6], смешения с биоразлагаемыми натуральными [7–10] или синтетическими эфирами [9–12]. Усиление слабых свойств минерального масла, в частности, температуры вспышки с помощью специальных присадок не дают существенного результата [3]. Однозначные

результаты пока не достигнуты и в области получения наножидкостей, базирующихся на минеральном масле и диспергированных в нем частиц размером от 1 до 100 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) таких соединений, как TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_3O_4 , SiO_2 , C_{60} и др. [4–6].

Смешением минерального масла и натурального эфира можно добиться усиления огнестойких свойств, повышения способности к разложению жидкости микроорганизмами, возрастания предела растворимости воды, и, как следствие, увеличения электрической прочности, а также срока службы твердой изоляции [7, 8, 10]. Однако добавление природного эфира к минеральному маслу приводит к существенному ухудшению одного из главных свойств — стойкости против окисления, поскольку натуральные эфиры изначально не обладают достаточным уровнем противоокислительной стабильности из-за наличия в структуре сложного эфира триглицерида соединений с двойными $\text{C}=\text{C}$ связями (моно-, ди- и триненасыщенные жирные кислоты) [6].

Синтетические эфиры, напротив, благодаря химической основе (сложные эфиры пентаэритрита) обладают превосходной стабильностью к окислению [11, 12]. Добавление синтетического сложного эфира к минеральному маслу по [9–12] позволяет улучшить такие характеристики, как температура вспышки, пробивное напряжение, биоразлагаемость, способность противостоять агрессивным эксплуатационным факторам, а также уменьшить влагосодержание в целлюлозной изоляции. Последнее положительно сказывается на механической прочности, а, следовательно, на рабо-

тоспособности бумажной изоляции трансформатора в течение длительного периода эксплуатации [13, 14].

Важным моментом при смешении жидкостей является определение пропорции смешения, которая будет максимально способствовать улучшению изоляционных характеристик полученной смеси без критического ухудшения других характеристик. В большей части исследований [9–14] предлагается смешение масла и эфира проводить в соотношении 80:20. Однако эта формула может быть эффективна только для нефтяного масла, по которому выполнено немало исследований зарубежными коллегами. Обусловлено это тем, что иностранными энергетическими компаниями используется в основном минеральное масло, полученное из нефтяной нефти. В России большая часть высоковольтного оборудования эксплуатируется с маслом на основе парафиновых углеводородов (масло марок ГК и ВГ), чуть меньше с ароматическим маслом, в число которых входят масла марки ТКп и Т-750. Структурно-групповой состав ароматического масла сильно отличается от нефтяного минерального масла (например, Shell Diala D), поэтому идеальная пропорция смешения масло-эфир для ароматического масла вполне может быть другой.

К изучению свойств смесей ароматического масла и синтетического эфира побуждает следующий немаловажный факт. Согласно требованиям стандарта [15] и других технических документов доливка масла в электрооборудование должна осуществляться с учетом области применения масла, а если быть точнее, с учетом группы стабильности против окисления. Масло ТКп и Т-750 относятся к низкой и средней окислительной стабильности соответственно. Данные марки масла нельзя смешивать с такими наиболее распространенными минеральными маслами, как ГК, ВГ, Nytro 11GX и др. Подтверждением тому служит работа [16]. Смешение ароматических масел допускается только либо между собой, либо доливкой масла такой же марки. С начала 90-х годов производство ароматических масел, в частности ТКп и Т-750, прекращено по экологическим соображениям. На складах энергетических предприятий не осталось запасов чистого масла ТКп и Т-750. Однако в действующем высоковольтном оборудовании магистральных электрических сетей, не говоря уже об оборудовании предприятий генерации электроэнергии и распределительных сетей, в настоящее время эксплуатируется около 36 тыс. т такого масла. Поэтому смешение ароматического масла со сложнэфирными диэлектрическими жидкостями, у которых имеются преобладающие свойства, следует рассматривать как возможность доливки для поддержания требуемого уровня изоляционной жидкости в высоковольтном оборудовании. Таким

образом, исследование свойств электроизоляционных смесей, состоящих из минерального масла с повышенным содержанием ароматических углеводородов и синтетического сложного эфира, является весьма актуальным.

Целью статьи является проведение оценки изоляционных свойств смесей, полученных на основе минерального масла с высоким содержанием ароматических углеводородов и диэлектрической сложнэфирной жидкости, для определения перспектив их применения в высоковольтном оборудовании.

Объектами исследования служили минеральное масло с высоким содержанием ароматических соединений (марки Т-750), синтетический эфир Midel 7131, а также их смеси. Выбор минерального масла объясняется вышеописанной проблемой, связанной с отсутствием подходящего масла при доливке к маслу Т-750. Применение синтетической диэлектрической жидкости Midel 7131 обусловлено его широкой коммерческой доступностью, а также превосходными изоляционными свойствами, что подтверждено данными исследований [11, 17].

В составе масла Т-750 содержится более 20% ароматических соединений. Ароматические соединения, с одной стороны, определяют положительное качество масла — способность масла поглощать газы и увеличивать стойкость масла к частичным разрядам. С другой стороны, повышенное содержание ароматических соединений в герметичных условиях способствуют образованию нерастворимого осадка, в том числе проводящего сульфида меди Cu_2S . Такая проблема особенно характерна для герметичных высоковольтных вводов с маслом Т-750, эксплуатируемых продолжительное время [18].

Диэлектрическая жидкость Midel 7131 компании M&I Materials Ltd Hibernia Way Trafford Park (Великобритания) представляет собой сложный эфир жирных кислот и многоатомного спирта — пентаэритрита, структура молекулы которого приведена на рисунке 1. Число

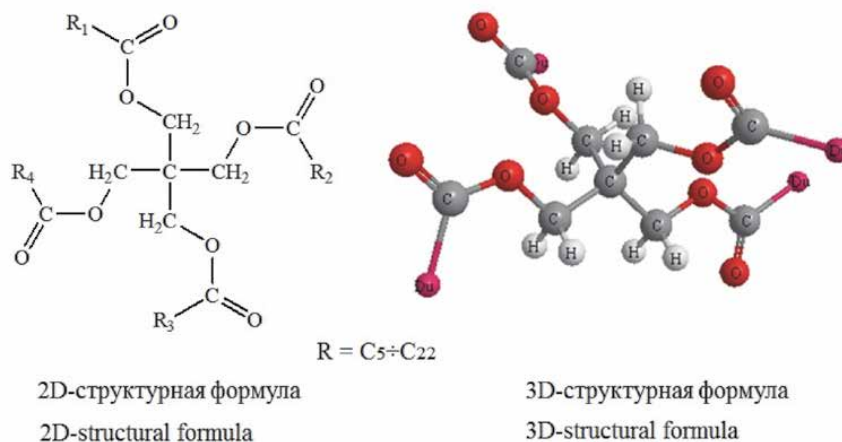


Рисунок 1. Химическая структура молекул синтетического эфира: пентаэритрита и карбоновых кислот (R -карбоксильный радикал с числом атомов углерода от 5 до 22) [17]
Figure 1. Chemical structure of synthetic ester molecules: pentaerythritol and carboxylic acids (R -carboxyl radical with 5 to 22 carbon atoms) [17]

атомов углерода в карбоксильном радикале (R) может составлять от C₅ до C₂₂, а структура этих радикалов может быть как линейной, так и изомерной. Кроме того, все четыре эфирные связи пентаэритрита могут включать одинаковые жирные кислоты (R₁=R₂=R₃=R₄) или четыре разных радикала (R₁≠R₂≠R₃≠R₄), что означает различные жирные кислоты с неодинаковым строением.

Перед проведением испытаний пробы ароматического масла, взятые из работающего оборудования (высоковольтные герметичные вводы), были очищены от воды с помощью адсорбентов, а также от растворенных газов методом дегазации. Синтетический эфир не требовал предварительной подготовки, так как поставляется очищенным от примесей (вода, воздух) в тщательно запечатанных канистрах.

Основные характеристики минерального масла и сложного эфира, а также стандартные документы, на основе которых проводились испытания изоляционных жидкостей, приведены в таблице 1.

Смеси на основе минерального масла (ММ) и синтетического эфира (СЭ) готовились при комнатной температуре с процентом содержания масла и эфира соответственно 95/5, 90/10, 80/20, 70/30 и 50/50.

Обработку полученных результатов (5–6 параллельных измерений) проводили по рекомендациям, приведенным в методиках на определение показателей масла. Относительное среднее квадратическое отклонение, которое является мерой рассеяния (разброса) результатов измерений вокруг среднего, рассчитанное по 6 параллельным измерениям, не превысило 10%.

Смешение масла и эфира. На рисунке 2 приведены

Таблица 1. Свойства изоляционных жидкостей

Table 1. Properties of insulating liquids

Показатель Property	Метод испытаний Method	Минеральное масло (ММ) Mineral oil (MO)	Синтетический эфир (СЭ) Synthetic ester (SE)
Внешний вид Appearance	ГОСТ Р 54331 IEC 60296	Желтая прозрачная жидкость без взвеси и осадка Yellow transparent liquid without suspension and sediment	Бесцветная прозрачная жидкость без взвеси и осадка Colorless transparent liquid without suspension and sediment
Плотность (ρ), г/см ³ Density (ρ), g/cm ³ при 20°C (at 20°C) при 40°C (at 40°C) при 60°C (at 60°C)	ГОСТ Р 51069 ISO 12185	0,873 0,865 0,857	0,970 0,956 0,943
Кинематическая вязкость, м ² /с Kinematic viscosity, mm ² /s при 25°C (at 25°C) при 40°C (at 40°C) при 60°C (at 60°C)	ГОСТ 33 ISO 3675	20,5 10,6 7,8	62,0 27,8 19,1
Температура вспышки в закрытом тигле ($T_{всп}$), °C Flash point (close cup), °C	ГОСТ 6356 ISO 2719	142	260
Пробивное напряжение ($U_{пр}$), кВ Breakdown voltage (BDV), kV	ГОСТ 6581 IEC 60156	54	77
Влагосодержание, г/т Water content, g/t (ppm)	ГОСТ Р МЭК 60814 IEC 60814	9,4	47,2
Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$), % Dielectric dissipation factor ($tg\delta$), % при 25°C (at 25°C) при 70°C (at 70°C) при 90°C (at 90°C)	ГОСТ 6581 IEC 60247	0,04 0,05 0,10	0,10 1,00 2,13
Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) Relative permittivity (ϵ_r) при 25°C (at 25°C) при 70°C (at 70°C) при 90°C (at 90°C)	ГОСТ 6581 IEC 60247	2,34 1,85 1,73	3,00 2,57 2,40

фотографии образцов масла с содержанием эфира от 0% до 100%. С целью проверки устойчивости на предмет однородности смеси нагревались и охлаждались от 60°C до –30°C в течение 3 часов при изменении температуры на каждые 10°C. На всем протяжении эксперимента смеси масла и эфира не расслаиваются и оста-

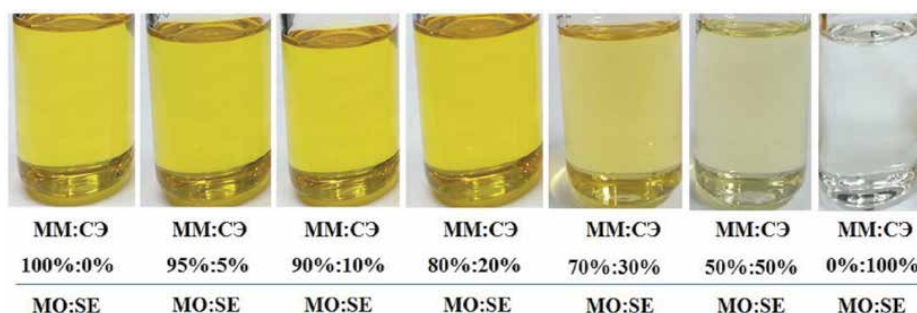


Рисунок 2. Внешний вид смесей минерального масла (ММ) и синтетического эфира (СЭ) в разных пропорциях

Figure 2. Appearance of mixtures of mineral oil (MM) and synthetic ester (SE) in different proportions

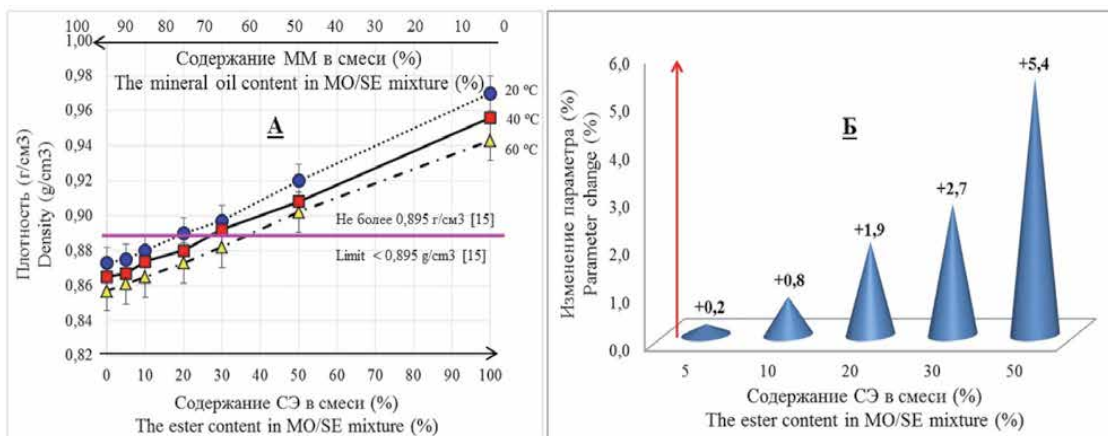


Рисунок 3. Значение плотности в зависимости от содержания синтетического эфира (СЭ) в минеральном масле (ММ): А) в абсолютном выражении; Б) изменение параметра в % от первоначального значения ρ масла при 20 °С

Figure 3. Density value depending on the content of synthetic ester (SE) in mineral oil (MO): A) in absolute terms; B) change in parameter in % of the initial value ρ of oil at 20 °С

ются гомогенными.

Плотность. Согласно стандарту [15] плотность минерального масла должна быть не более 0,895 г/см³ при 20 °С. Плотность такого масла при температуре 0 °С составит порядка 0,910 г/см³. Такая плотность меньше плотности льда (0,920 г/см³), поэтому кристаллы воды, образующиеся в толще масла при температуре 0 °С и ниже, опускаются на дно. В случае плотности кристаллов льда, близкой к плотности охлажденного масла, частицы льда находятся во взвешенном состоянии и могут спровоцировать электрический пробой. Поэтому изоляционные жидкости с высокими значениями плотности при низких температурах являются нежелательными для использования вследствие возможности всплытия кристаллов льда. Сравнивая полученные результаты с установленной нормой плотности 0,895 г/см³ при 20 °С можно сделать вывод, что смеси с содержанием эфира более 20% не подходят для применения в высоковольтном оборудовании (рисунок 3). Однако, стоит заметить, что для диэлектрических сложнэфирных жидкостей граничное значение плотности

при температуре 20 °С составляет не более 1,00 г/см³, то есть больше плотности льда [19].

Кинематическая вязкость является важным физико-техническим параметром. Для достижения высокой теплопередачи в силовых трансформаторах за счет конвекции необходимы низкое значение вязкости и хорошая удельная теплоемкость. Вязкость минерального масла намного ниже вязкости синтетического эфира. Поэтому с увеличением доли эфира вязкость смеси увеличивается (рисунок 4): для 5%-го содержания эфира вязкость, измеренная при 40 °С, возрастает почти на 9% (с 10,6 мм²/с до 11,5 мм²/с), а для 10%-ой смеси — на 18% (с 10,6 мм²/с до 12,5 мм²/с). При содержании эфира 20% вязкость достигает недопустимого значения 13,8 мм²/с, превышающего установленное стандартом [15] нормативное значение (12 мм²/с при 40 °С). Повышение вязкости изоляционной жидкости, прежде всего, сильно влияет на теплофизические характеристики, в том числе, на ухудшение теплопередачи внутри трансформатора [20].

Температура вспышки. На рисунке 5А показаны ре-

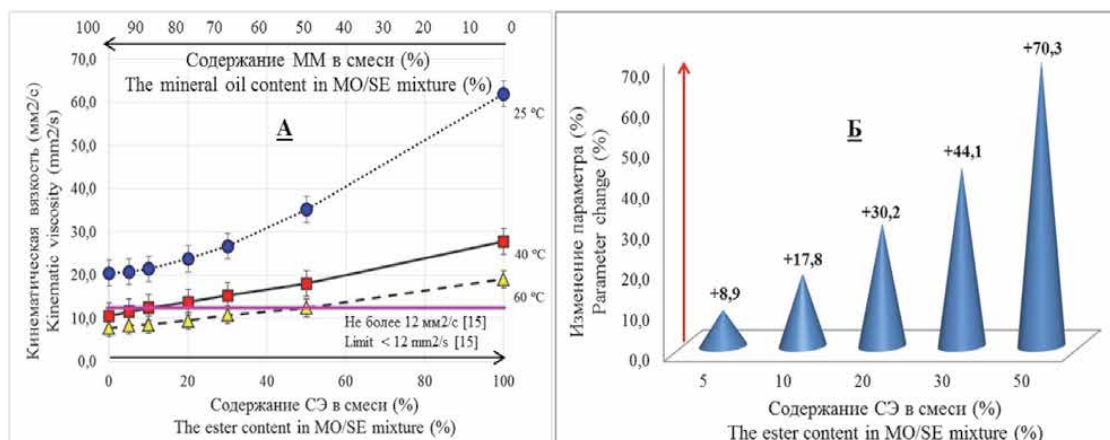


Рисунок 4. Значение кинематической вязкости в зависимости от содержания синтетического эфира (СЭ) в минеральном масле (ММ): А) в абсолютном выражении; Б) изменение параметра в % от первоначального значения η масла при 40 °С

Figure 4. The value of kinematic viscosity, depending on the content of synthetic ester (SE) in mineral oil (MO): A) in absolute terms; B) change in the parameter in % of the initial value of η oil at 40 °С

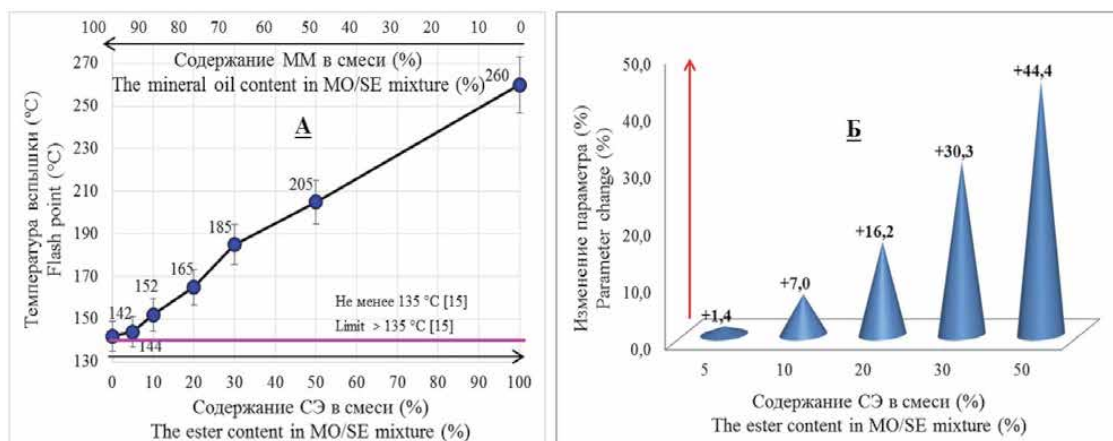


Рисунок 5. Значение температуры вспышки в зависимости от содержания синтетического эфира (СЭ) в минеральном масле (ММ): А) в абсолютном выражении; Б) изменение параметра в % от первоначального значения $T_{всп}$ масла

Figure 5. Flash point value depending on the content of synthetic ester (SE) in mineral oil (MO): A) in absolute terms; B) change in the parameter in % of the initial value of T_{flash} oil

зультаты измерений температуры вспышки в закрытом тигле смесей минерального масла и синтетического сложного эфира. Согласно представленной информации с увеличением содержания сложного эфира температура вспышки повышается. Для смеси, в которой процентное содержание синтетического сложного эфира составляет 50%, значение температуры вспышки достигает 205°C, что приводит к улучшению данного показателя на 44,4% (рисунок 5Б).

Минеральное масло относится к многокомпонентным коллоидным системам, состоящим из разных углеводородных фракций: тяжелой, средней и легкой. В легкую фракцию входят, прежде всего, газообразные углеводороды от C_1 до C_4 . Легкие вещества в минеральном масле выделяются при значительно более низких температурах, чем в случае синтетического эфира, основой которого является тяжелый высокомолекулярный эфир пентаэритрита. Увеличение доли эфира в смеси приводит к повышению тяжелой фракции и, соответственно, уменьшению доли легких компонентов минерального масла, что и обуславливает повы-

шение температуры вспышки изоляционной смеси.

Тангенс угла диэлектрических потерь. Значение $tg\delta$ полученных изоляционных жидкостей возрастает пропорционально содержанию эфира в смеси. В силу своей полярной природы диэлектрическая сложноэфирная жидкость Midel 7131 уже в начальном состоянии имеет несколько более высокий тангенс по сравнению с минеральным маслом (таблица 1, рисунок 6). При добавлении синтетического эфира к маслу в количестве более 20% по объему значение тангенса угла диэлектрических потерь превышает граничный предел (0,5% при 90°C), установленный для товарных масел [15]. Повышенное значение тангенса угла диэлектрических потерь масла сказывается и на диэлектрических потерях бумажной изоляции вследствие ее пропитки смесью масла и эфира, но в то же время минеральное масло с добавленным к нему синтетическим эфиром положительно влияет на срок службы твердой изоляции [13].

Диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость жидкости относится к важным электрофизическим параметрам, характеризующим

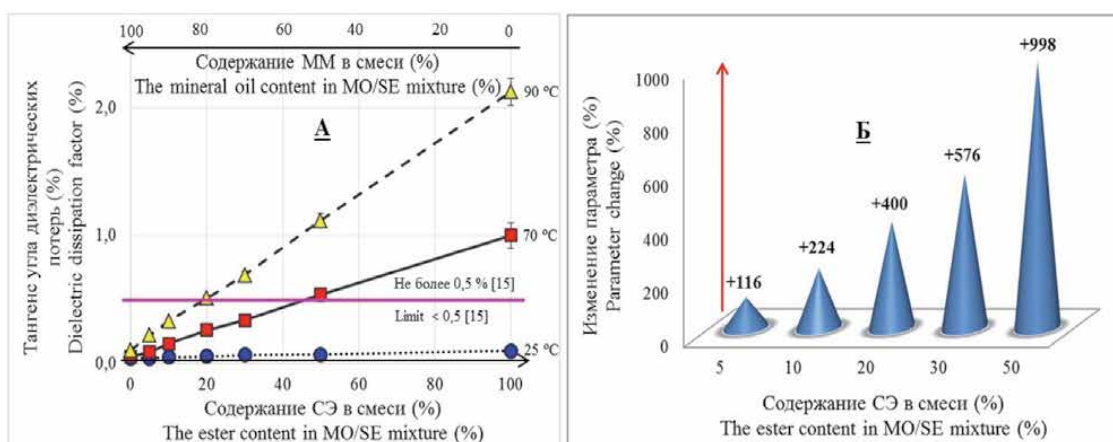


Рисунок 6. Значение тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от содержания синтетического эфира (СЭ) в минеральном масле (ММ): А) в абсолютном выражении; Б) изменение параметра в % от первоначального значения $tg\delta$ масла при температуре 90°C

Figure 6. The value of the dielectric dissipation factor $tg\delta$ (%) depending on the content of synthetic ester (SE) in mineral oil (MO): A) in absolute terms; B) change in the parameter in % of the initial $tg\delta$ value of the oil at a temperature of 90°C

дипольный момент и поляризуемость молекул. Минеральное изоляционное масло, в частности Т-750, в силу небольшого количества полярных молекул изначально имеет небольшую величину относительной диэлектрической проницаемости (2,34). Полярные группы С=О и эфирные мостики С-О-С в молекулах синтетического сложного эфира Midel 7131, обладающие дипольным моментом, обуславливают слабополярную природу жидкости Midel 7131, и, соответственно, более высокую ϵ_r , равную 3,00. Смешение этих двух жидкостей ведет к возрастанию относительной диэлектрической проницаемости пропорционально увеличению доли сложноэфирной жидкости в минеральном масле (рисунок 7А). Относительно высокое значение ϵ_r смеси достигается при 50%-ном содержании сложноэфирной жидкости ($\epsilon_r > 2,6$). Приближение значения относительной диэлектрической проницаемости изоляционной жидкости к ϵ_r целлюлозной изоляции ($\epsilon_r = 3,6 \div 4,7$) будет положительно сказываться на выравнивании напряженности поля в системе «целлюлоза – жидкость».

Пробивное напряжение и влагосодержание. На рисунке 8 приведены результаты измерений пробивного напряжения и влагосодержания в смеси масла с эфиром.

Анализируя данные, можно заметить, что пробивное напряжение возрастает пропорционально с увеличением доли эфира в масле. Содержание воды в эфире изначально составляло почти в 2 раза больше, чем в масле, поэтому добавление эфира сказывается и на повышении влагосодержания в смесях. Несмотря на это, во всех смесях сохраняется высокий уровень пробивного напряжения, особенно значительный рост данного показателя по сравнению с минеральным маслом без добавления эфира наблюдается в смесях с содержанием эфира 20% и выше. Объясняется это тем, что синтетические эфиры имеют высокий предел растворимости воды, примерно в 30 раз больше, чем у масла (или 2500 г/т против 70 г/т при 25°C) [17]. Из всех существующих форм воды в жидком диэлектрике значительное влияние на снижение пробивного напряжения оказывает эмульсионная или диспергированная

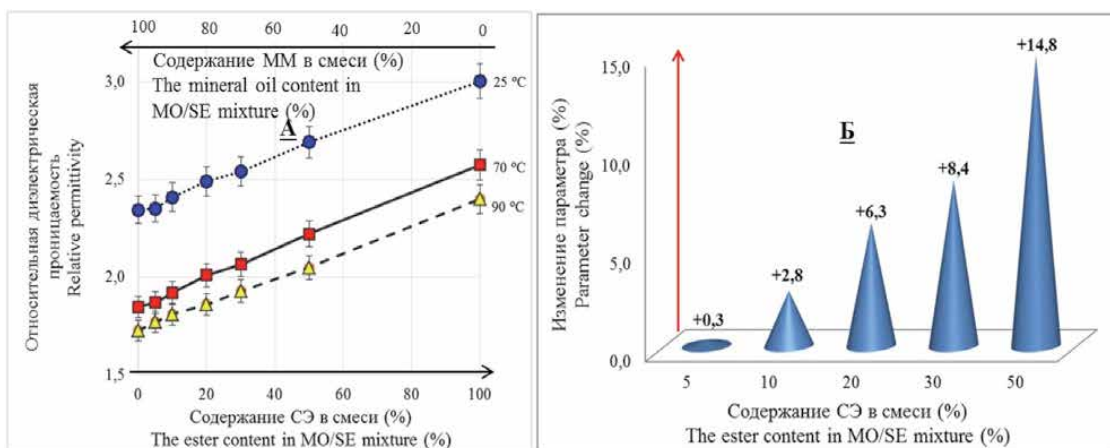


Рисунок 7. Значение относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от содержания синтетического эфира (СЭ) в минеральном масле (ММ): А) в абсолютном выражении; Б) изменение параметра в % от первоначального значения ϵ_r масла при температуре 25°C
Figure 7. The value of the relative permittivity, depending on the content of synthetic ester (SE) in mineral oil (MO): A) in absolute terms; B) change in parameter in % of the initial value of ϵ_r of oil at a temperature of 25°C

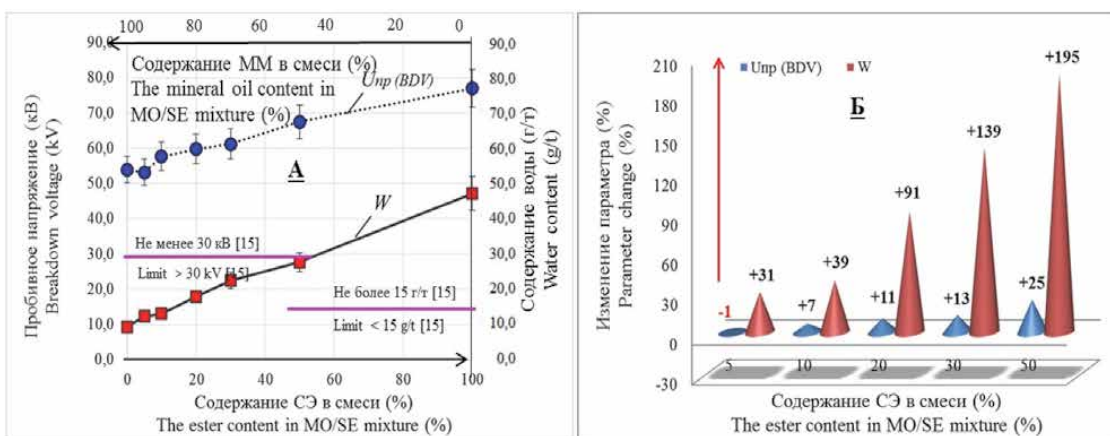


Рисунок 8. Значение пробивного напряжения (U_{np}) и влаги (W) в зависимости от содержания синтетического эфира (СЭ) в минеральном масле (ММ): А) в абсолютном выражении; Б) изменение параметра в % от первоначального значения U_{np} и W масла
Figure 8. Breakdown voltage (BDV) and moisture (W) value depending on the content of synthetic ester (SE) in mineral oil (MO): A) in absolute terms; B) change in the parameter in % of the initial value of BDV and W oil

вода. При добавлении относительно полярного эфира к неполярному маслу влага переходит из эмульсионного состояния в растворенное, тем самым существенно уменьшая влияние влажности на значение пробивного напряжения [7]. Граничные значения пробивного напряжения и влагосодержания для свежих масел или регенерированных, приведенные в нормативном документе [15], составляют от 30 кВ и не более 15 г/т соответственно. Поэтому все смеси могут использоваться в высоковольтном оборудовании, но с обязательным доведением характеристик до норм с помощью специальных методов очистки от воды.

В таблице 2 приведены консолидированные данные, полученные при измерении параметров смеси ароматического минерального масла и синтетического сложного эфира.

Таким образом, добавление синтетического эфира к минеральному маслу в количестве от 5% до 50% по объему приводит к существенному улучшению таких характеристик, как пробивное напряжение, температура вспышки, а также относительная диэлектрическая постоянная. В то же время смешение этих двух изоляционных жидкостей сопровождается нежелательным

увеличением плотности, кинематической вязкости, тангенса угла диэлектрических потерь, особенно при содержании эфира в масле более 10%. Эксплуатация высоковольтного оборудования с изоляционной смесью масла и эфира, обладающей высокой вязкостью и плотностью, особенно проблематична при температурных колебаниях изоляционной системы. Учитывая данный факт, работа электрооборудования в нормальном режиме (при содержании эфира в смеси более 10%) возможна лишь с предварительной модификацией его конструкции, например, путем увеличения изоляционных промежутков, изменения системы охлаждения и т. д.

Оценивая значимость каждого параметра изоляционной жидкости, можно отметить, что пробивное напряжение является наиболее важным электрофизическим свойством любого жидкого диэлектрика. Опыты показывают, что несмотря на увеличение влагосодержания, электрическая прочность изоляционной смеси остается на высоком уровне. Близкие значения относительной диэлектрической проницаемости изоляционной жидкости и целлюлозной изоляции способствует выравниванию напряженности поля в системе «целлюлоза – жидкость», и, следовательно, будет уменьшать количество мест с высокой напряженностью электрического поля, а также вероятность возникновения и интенсивность частичных разрядов. Увеличение температуры вспышки в закрытом тигле изоляционных смесей является чрезвычайно важной тенденцией, так как это указывает на усиление огнестойких свойств жидкости в случае возникновения пожара. Именно сильных противопожарных свойств недостает минеральному маслу, поэтому добавление эфира, особенно в количестве 50%, значительно улучшает данный показатель. Тангенс угла диэлектрических потерь изоляционной смеси с содержанием сложного эфира более 20% превышает предельно-допустимое значение, установленное для минерального масла в эксплуатации [15]. Однако пока не понятно, как увеличение диэлектрических потерь изоляционной жидкости скажется на состоянии твердой изоляции трансформатора. В данном направлении требуется дополнительные исследования. В более глубоких исследованиях нуждается такой факт, как увеличение вязкости и плотности смесей. Поскольку данные показатели отвечают за теплопередачу внутри трансформатора и образование кристаллических включений соответственно. Поэтому в дальнейшем необходимо

Таблица 2. Характеристики смесей минерального масла (ММ) и диэлектрической сложной эфирной жидкости (СЭ)

Table 2. Properties of mixtures of mineral oil (MO) and synthetic dielectric ester liquid (SE)

Показатель Property	Пропорция минерального масла (ММ) и синтетического эфира (СЭ), % MM:SE Proportion of mineral oil (MM) and synthetic ester (SE),% MO:SE				
	95:5	90:10	80:20	70:30	50:50
Плотность (ρ), г/см ³ Density (ρ), g/cm ³ при 20°C (at 20°C) при 40°C (at 40°C) при 60°C (at 60°C)	0,875 0,867 0,861	0,880 0,874 0,865	0,890 0,880 0,873	0,897 0,892 0,882	0,920 0,908 0,902
Кинематическая вязкость, мм ² /с Kinematic viscosity, mm ² /s при 25°C (at 25°C) при 40°C (at 40°C) при 60°C (at 60°C)	20,8 11,5 8,3	21,5 12,5 8,6	23,8 13,8 9,5	26,8 15,3 10,8	35,3 18,1 12,4
Температура вспышки в закрытом тигле ($T_{всп}$), °C Flash point (close cup) (T_{flash}), °C	144	152	165	185	205
Пробивное напряжение ($U_{пр}$), кВ Breakdown voltage (BDV), kV	53,2	57,7	59,8	61,2	67,5
Влагосодержание, г/т Water content, g/t (ppm)	12,3	13,1	18,0	22,5	27,7
Тангенс угла диэлектрических потерь (tg δ), % Dielectric dissipation factor (tg δ), % при 25°C (at 25°C) при 70°C (at 70°C) при 90°C (at 90°C)	0,04 0,09 0,22	0,05 0,15 0,33	0,05 0,26 0,51	0,06 0,34 0,69	0,07 0,54 1,12
Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) Relative permittivity (ϵ_r) при 25°C (at 25°C) при 70°C (at 70°C) при 90°C (at 90°C)	2,35 1,87 1,77	2,41 1,92 1,81	2,49 2,01 1,86	2,54 2,07 1,93	2,69 2,22 2,05

провести математические расчеты и опыты на тепловых моделях силовых трансформаторов конкретных типов.

Резюмируя полученные данные по изученным электрофизическим характеристикам, можно отметить, что изоляционные смеси минерального ароматического масла с содержанием эфира до 10% могут использоваться в силовых трансформаторах, высоковольтных вводах, высоковольтных выключателях, измерительных трансформаторах напряжения и трансформаторах тока напряжением до 110 кВ, поскольку значения показателей (пробивное напряжение, влагосодержание, температура вспышки, плотность, вязкость) соответствуют требованиям СТО [15]. В любом случае, перед доливкой в оборудование сложноэфирную жидкость или приготовленные смеси следует очищать от содержащейся в них воды.

Несомненно, для понимания степени надежности эксплуатации и увеличения временного периода бесперебойной работы высоковольтного оборудования необходимо провести как можно более полную оценку свойств смесей минерального масла и сложноэфирной жидкости. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на изучение физико-химических показателей, а именно, стабильность к окислению, факторы, влияющие на ускоренное образование полярных соединений, а также поведение изоляционных смесей в процессе продолжительного термического окисления с доступом и без доступа воздуха. Будущие исследования затронут такие важные вопросы, как влияние повышения вязкости на теплообмен, влияние увеличения плотности на образование кристаллов льда в толще масла, влияние повышенного значения тангенса угла диэлектрических потерь на состояние изоляционной бумаги, возникновение и интенсивность частичных разрядов, образование газов под воздействием повышенной температуры и высокого напряжения. Кроме того, немаловажным является и изучение вопроса о совместимости смесей масла и эфиров с конструкционными материалами электрооборудования. Понимание физико-химических процессов, происходящих в изоляционной жидкости на молекулярном уровне под воздействием различных факторов, а также изучение электрофизических явлений поможет глубже оценить перспективность использования смесей минерального масла и сложноэфирной жидкости в электрооборудовании.

Выводы

1. Смешение ароматического минерального масла с синтетической диэлектрической жидкостью позволяет усилить такие показатели масла, как пробивное напряжение, температура вспышки, относительная диэлектрическая проницаемость. При этом улучшение показателей изоляционной смеси происходит пропорционально добавляемому эфиру от 5% до 50%, несмотря на увеличение общего влагосодержания.

2. При содержании синтетического эфира в масле до 20% плотность (при 20°C) и тангенс угла диэлектриче-

ских потерь (при 90°C) увеличиваются в допустимых пределах относительно нормируемых значений для минерального масла.

3. Оценивая значения кинематической вязкости изоляционной смеси, состоящей из 90% ароматического масла и 10% синтетической сложноэфирной жидкости, можно отметить, что такая пропорция смешения является предельной для применения в электрооборудовании без ограничения в нагрузках и внесения каких-либо конструктивных изменений. Однако, данный вывод, несомненно, подлежит дополнительной проверке на тепловых моделях силовых трансформаторов конкретных типов.

Список использованных источников

1. Wang X., Tang Ch., Huang B., Hao J., Chen G. Review of Research Progress on the Electrical Properties and Modification of Mineral Insulating Oils Used in Power Transformers. *Energies* 2018; 11(487): 1–31.
2. Mohan Rao U., Fofana I., Jaya T., Rodriguez-Celis E. M., Jalbert J., Picher P. Alternative Dielectric Fluids for Transformer Insulation System: Progress, Challenges, and Future Prospects. *IEEE Access* 2019; (7): 184552–184571.
3. Huang Y., Wei J., Yi J. Combustion behavior of mineral insulating oil with addition of flame retardants. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2020. DOI:10.1088/1755-1315/508/1/012155.
4. Chen J., Sun P., Sima W., Shao Q., Ye L., Li Ch. A Promising Nano-Insulating-Oil for Industrial Application: Electrical Properties and Modification Mechanism. *Nanomaterials* 2019; 9(788): 1–24.
5. Khaled U., Beroual A. Influence of Conductive Nanoparticles on the Breakdown Voltage of Mineral Oil, Synthetic and Natural Ester Oil-based Nanofluids. *IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Italy 2019: 1–4.
6. Rafiq M., Shafique M., Azam A., Ateeq M., Khan I. A., Hussain A. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications. *Molecules* 2020; 25(3901): 1–43.
7. Nadolny Z., Dombek G. Thermal properties of mixture of mineral oil and natural ester in terms of their application in the transformer. *E3S Web of Conferences* 19 01040 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171901040.
8. Beroual A., Sitorus H. B. H., Setiabudy R., Bismo S. Comparative study of AC and DC breakdown voltages in *Jatropha methyl ester oil*, mineral oil, and their mixtures. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2018; 25(5): 1831–1836.
9. Beroual A., Khaled U., Seraphine P., Sitorus H. Comparative study of breakdown voltage of mineral, synthetic and natural oils and based mineral oil mixtures under AC and DC voltages. *Energies* 2017; 10(4): 5–11.
10. Rouabeh J., M'Barki L., Hammami A., Jallouli I., Driss A. Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers. *Heliyon* 2019; 5(e01159).
11. Rozga P., Beroual A., Przybyłek P., Jaroszewski M., Strzelecki K. A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications. *Energies* 2020; 13(6429).
12. Hamdi A., Fofana I., Mahi D. Stability of mineral oil and oil-ester mixtures under thermal ageing and electrical discharges. *IET Gener. Trans. Distrib* 2017;11(9): 2384–2392.

13. Zukowski P., Rogalski P., Koltunowicz T. N., Kierczynski K., Subocz J., Zenker M. Cellulose Ester Insulation of Power Transformers: Researching the Influence of Moisture on the Phase Shift Angle and Admittance. *Energies* 2020; 13(5511).

14. Zdanowski M., Maleska M. Streaming electrification of insulating liquids mixtures. *Archives of Electrical Engineering* 2019; 68(2): 387–397.

15. Объем и нормы испытаний электрооборудования: СТО 34.01-23.1-001-2017. – М.: ПАО «Россети» 2017;: 262.

16. Лютикова М. Н., Коробейников С. М. О проблемах смешения разных марок минеральных изоляционных масел. Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики 2019;: 100–106.

17. MIDEL 7131. Синтетическая диэлектрическая трансформаторная жидкость. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL-7131-Product-Brochure.pdf> (Дата обращения: 11.11.2020).

18. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Коновалов А. А. Внедрение спектральных методов в диагностику маслонаполненного высоковольтного оборудования. Надежность и безопасность энергетики 2020; 13(2): 110–118.

19. Mohan Rao U., Fofana I., N'cho S. J. On Some Imperative IEEE Standards for Usage of Natural Ester Liquids in Transformers. *IEEE Access* 2018; (8): 2169–3536.

20. Salama M. M., Mansour D. E., Daghra S. M., Abbas A. Thermal performance of transformers filled with environmentally friendly oils under various loading conditions. *Electrical Power and Energy Systems* 2020; (118): 1–10.

References

1. Wang X., Tang Ch., Huang B., Hao J., Chen G. Review of Research Progress on the Electrical Properties and Modification of Mineral Insulating Oils Used in Power Transformers. *Energies* 2018; 11(487): 1–31.

2. Mohan Rao U., Fofana I., Jaya T., Rodriguez-Celis E. M., Jalbert J., Picher P. Alternative Dielectric Fluids for Transformer Insulation System: Progress, Challenges, and Future Prospects. *IEEE Access* 2019; (7): 184552–184571.

3. Huang Y., Wei J., Yi J. Combustion behavior of mineral insulating oil with addition of flame retardants. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2020. DOI:10.1088/1755-1315/508/1/012155.

4. Chen J., Sun P., Sima W., Shao Q., Ye L., Li Ch. A Promising Nano-Insulating-Oil for Industrial Application: Electrical Properties and Modification Mechanism. *Nanomaterials* 2019; 9(788): 1–24.

5. Khaled U., Beroual A. Influence of Conductive Nanoparticles on the Breakdown Voltage of Mineral Oil, Synthetic and Natural Ester Oil-based Nanofluids. *IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Italy* 2019: 1–4.

6. Rafiq M., Shafique M., Azam A., Ateeq M., Khan I. A., Hussain

A. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications. *Molecules* 2020; 25(3901): 1–43.

7. Nadolny Z., Dombek G. Thermal properties of mixture of mineral oil and natural ester in terms of their application in the transformer. *E3S Web of Conferences* 19 01040 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171901040.

8. Beroual A., Sitorus H. B. H., Setiabudy R., Bismo S. Comparative study of AC and DC breakdown voltages in Jatropha methyl ester oil, mineral oil, and their mixtures. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 2018; 25(5): 1831–1836.

9. Beroual A., Khaled U., Seraphine P., Sitorus H. Comparative study of breakdown voltage of mineral, synthetic and natural oils and based mineral oil mixtures under AC and DC voltages. *Energies* 2017; 10(4): 5–11.

10. Rouabeh J., M'Barki L., Hammami A., Jallouli I., Driss A. Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers. *Heliyon* 2019; 5(e01159).

11. Rozga P., Beroual A., Przybylek P., Jaroszewski M., Strzelecki K. A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications. *Energies* 2020; 13(6429).

12. Hamdi A., Fofana I., Mahi D. Stability of mineral oil and oil-ester mixtures under thermal ageing and electrical discharges. *IET Gener. Trans. Distrib* 2017; 11(9): 2384–2392.

13. Zukowski P., Rogalski P., Koltunowicz T. N., Kierczynski K., Subocz J., Zenker M. Cellulose Ester Insulation of Power Transformers: Researching the Influence of Moisture on the Phase Shift Angle and Admittance. *Energies* 2020; 13(5511).

14. Zdanowski M., Maleska M. Streaming electrification of insulating liquids mixtures. *Archives of Electrical Engineering* 2019; 68(2): 387–397.

15. The scope and standards of testing electrical equipment: СТО 34.01-23.1-001-2017. – М.: ПАО «Россети» 2017;: 262 (In Russ.)

16. Lyutikova M. N., Korobeynikov S. M. About the problems of mixing different brands of mineral insulating oils. *Modern problems of electrophysics and electrohydrodynamics* 2019;: 100–106. (In Russ.)

17. MIDEL 7131. Synthetic dielectric transformer liquid. – Available: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL-7131-Product-Brochure.pdf>.

18. Lyutikova M. N., Korobeynikov S. M., Konovalov A. A. The introduction of spectral methods in the diagnosis of oil-filled high-voltage equipment. *Safety and Reliability of Power Industry* 2020; 13(2): 110–118. (In Russ.)

19. Mohan Rao U., Fofana I., N'cho S.J. On Some Imperative IEEE Standards for Usage of Natural Ester Liquids in Transformers. *IEEE Access* 2018; (8): 2169–3536.

20. Salama M. M., Mansour D. E., Daghra S. M., Abbas A. Thermal performance of transformers filled with environmentally friendly oils under various loading conditions. *Electrical Power and Energy Systems* 2020; (118): 1–10.

