

УДК 621.315.615:621.319.4

doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13

ВИБІР ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ІМПУЛЬСНОГО КОНДЕНСАТОРА, ЩО ПРИЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В РЕЖИМІ З ВИСОКОЮ ЧАСТОТОЮ ПРОХОДЖЕННЯ ЗАРЯДІВ-РОЗРЯДІВ

В. І. ГУНЬКО*, О. Я. ДМИТРИШИН, А. П. МАЛЮШЕВСЬКА, С. О. ТОПОРОВ

Відділ високовольтних імпульсних конденсаторів, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, УКРАЇНА
*e-mail: dphc@iipr.com.ua

АНОТАЦІЯ Робота присвячена вибору діелектричної системи (твердий робочий діелектрик - рідкий діелектрик, що просочує) для високовольтного імпульсного конденсатора, який експлуатується в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів. Вибір оптимальної системи для такого конденсатора потребує проведення аналітичного огляду діелектричних матеріалів, що застосовуються у високовольтному конденсаторобудуванні. Так як високовольтний імпульсний конденсатор призначений для експлуатації з високою частотою проходження зарядів-розрядів, то огляд виконувався виключно по неполярних діелектричним матеріалам, які в порівнянні з полярними мають більш ніж на порядок меншими діелектричними втратами, і одночасно високою електричною міцністю. В якості твердого робочого діелектрика однозначно обраний діелектрик на основі шарів тільки полімерної плівки. З полімерних плівок для робочого діелектрика обрана поліпропіленова плівка, також розглянуті її діелектричні характеристики в залежності від місця і способу виробництва. У нашому випадку була обрана поліпропіленова плівка українського виробництва, яка за своїми електрофізичними характеристиками не поступається плівкам провідних країн-виробників. При виборі рідкого діелектрика, що просочує плівковий робочий діелектрик розглядалися неполярні діелектричні рідини, що мають малу кінематичну в'язкість. Розглянуто властивості малов'язких діелектричних рідин від провідних країн-виробників. Розглянуто характеристики рідких діелектриків на основі мінеральних масел, які тривалий час застосовуються в високовольтній техніці, проте горючість, неоднорідність характеристик, недостатньо висока електрична стійкість в електричному полі призвело до їх заміни на синтетичні рідини. Розглянуто властивості кремнійорганічних рідин (зокрема поліметилсілоксанов), синтетичних вуглеводнів (зокрема суміші моно- і дібензілтолуолів (JARILEC C101) і фенілксилетана (ФКЕ)). Проведена порівняльна оцінка їх діелектричних характеристик. На основі проведеного аналізу надано рекомендації щодо застосування діелектриків для діелектричної системи високовольтного імпульсного конденсатора, який призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів.

Ключові слова: плівковий діелектрик; поліпропіленова плівка; діелектрична просочуюча рідина; частота проходження; високовольтний імпульсний конденсатор

SELECTION OF THE DIELECTRIC SYSTEM OF A HIGH-VOLTAGE PULSED CAPACITOR INTENDED FOR OPERATION IN THE MODE WITH A HIGH FREQUENCY OF CHARGE-DISCHARGE REPETITION

V. GUN'KO, A. DMITRISHIN, A. MALUSHAVSKAYA, S. TOPOROV

Department of high-voltage pulsed capacitor, Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT The work is devoted to the selection of a dielectric system (solid working dielectric - liquid impregnating dielectric) for a high-voltage pulse capacitor, which is operated in a mode with a high repetition rate of charge-discharges. The choice of the optimal system for such a capacitor required an analytical review of dielectric materials used in high-voltage capacitor construction. Since a high-voltage pulse capacitor is designed for operation with a high repetition rate of charge-discharges, it was performed exclusively on non-polar dielectric materials, which have, compared to polar, more than order of magnitude lower dielectric losses and, at the same time, high electrical strength. As a solid working dielectric, a dielectric based on layers of only a polymer film is uniquely selected. A polypropylene film was selected from polymer films for the working dielectric, and its dielectric characteristics were also considered depending on the place and method of production. In our case, a polypropylene film of Ukrainian production was chosen, which in its electrophysical characteristics is not inferior to the films of leading manufacturing countries. When choosing a liquid impregnating dielectric for a film working dielectric, non-polar dielectric liquids with a low kinematic viscosity were considered. The properties of low-viscosity dielectric liquids from leading manufacturing countries are considered. The characteristics of liquid dielectrics based on mineral oils, which have been used for a long time in high-voltage technology, are considered, however, the combustibility, heterogeneity of characteristics, and insufficiently high electrical resistance in an electric field led to their replacement with synthetic liquids. The properties of organosilicon liquids (in particular polymethylsiloxanes), synthetic hydrocarbons (in particular, a mixture of mono- and dibenzyltoluenes (JARILEC C101) and phenyl-xylene ethane (PXE)) are considered. A comparative assessment of their dielectric characteristics is carried out. Based on the analysis, recommendations are given on the use of dielectrics for a dielectric system of a high-voltage pulse capacitor, which is designed for operation in a mode with a high repetition rate of charge-discharges.

Keywords: film dielectric; polypropylene film; dielectric impregnating fluid; repetition rate; high-voltage pulse capacitor

Вступ

В даний час Інститутом імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, проводяться

роботи по створенню високовольтних імпульсних конденсаторів, призначених для експлуатації в режимах з високою частотою проходження зарядів-розрядів до 100 Гц.

Проектування будь-якого конденсатора завжди починається з вибору його діелектричної системи. В той же час, поєднання заданих значень номінальної ємності конденсатора C_n , його робочої напруги U_p , частоти проходження зарядів-розрядів f при його експлуатації та температури навколишнього середовища t_0 вже зумовлюють використання лише декількох діелектриків з всього різноманіття діелектричних матеріалів.

Мета роботи

Проведення аналітичного огляду діелектричних матеріалів, що використовуються при створенні високовольтних імпульсних конденсаторів, призначених для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів.

Викладення основного матеріалу

Так як високовольтний імпульсний конденсатор, що створюється, призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів (до 100 Гц), то як основний елемент його діелектричної системи повинна бути обрана електроізоляційна полімерна плівка, що має високу електричну міцність і низькі діелектричні втрати [1].

Пріоритетною при створенні конденсаторів із плівковим робочим діелектриком, що працюють в високочастотному режимі, є поліпропіленова плівка, що відноситься до неполярних діелектриків [2].

Поліпропіленову плівку виготовляють з ізотактичного поліпропілену й завдяки поєднанню високої електричної міцності, низьких діелектричних втрат, малого вмісту слабких місць на одиницю площі, дешевизні та можливості широкої модифікації технологічних властивостей, виробництво такої плівки є широко розвинутим у світі [3]. Властивості плівки у великій мірі залежать від способу виготовлення – екструзією або видуванням. Способом видування виготовляється більш м'яка плівка і з більшим розкидом за товщиною, а способом екструзії – більш тонка, більш тверда та з меншим розкидом. У США застосовують спосіб видування, у Франції, Італії, Україні й Німеччині – спосіб екструзії, у Японії – обидва способи. Поверхня плівки може мати як природну, так і штучно додану односторонню або двосторонню шорсткість. Наявність шорсткості на поверхні плівки облегшує процес просочення конденсаторів, а також облегшує процес намотування секцій, знижуючи злипання шарів плівки. Рекомендований температурний діапазон експлуатації поліпропіленової плівки від мінус 60 °С до плюс 100 °С є доволі широким. Необхідно відзначити, що електрофізичні характеристики поліпропіленової плівки різних виробників відрізняються між собою незначно.

Крім того, проведені раніше в ІІІТ НАН України експериментальні дослідження з оцінки довговічності застосовуваних у високовольтному конденсаторобудуванні полімерних плівок, а саме: поліпропіленової (італійського та українського виробництва), поліетиленової, політетрафторетиленової, поліімідної, полікарбонатної та поліетилентерефталатної, дозволили розглядати поліпропіленову плівку українського виробництва, як найбільш технологічно придатну та найбільш електрично міцну [4].

Таким чином, для створення високовольтного імпульсного конденсатора, що призначений для експлуатації з високою частотою проходження зарядів-розрядів, може бути обрана поліпропіленова плівка Tervakoski Film марки RER, ТУ У 25.2-25093118-001 виробництва фірми ЗАТ СП „ТЕРИХЕМ-ЛУЦК”, Україна. Плівка характеризується електричною міцністю не менш 210 кВ/мм, відносною діелектричною проникністю ϵ (при 20 °С і частоті 10 Гц) – 2,2, тангенсом кута діелектричних втрат $tg\delta$ (при 20 °С і діапазоні частот від 50 Гц до 10⁶ Гц) – 2·10⁻⁴, максимальною температурою експлуатації плівки – 100 °С (тривала), 120 °С (короткочасна) [5].

У частині вибору рідкого просочуючого діелектрика однозначних рекомендацій не має. Просочуюча електроізоляційна рідина призначена для заповнення вільного простору між шарами робочого діелектрика конденсатора, підвищує його електричну міцність і величину відносної діелектричної проникності діелектричної системи в цілому, що у свою чергу позитивно позначається на питомих та експлуатаційних характеристиках. Вимоги, які пред'являють до рідких просочуючих діелектриків, дуже суперечливі. Рідини повинні характеризуватися високою електричною міцністю, мати одночасно високе значення відносної діелектричної проникності та низьке значення тангенса кута діелектричних втрат, малу в'язкість у діапазоні робочих температур конденсатора. Рідкий діелектрик повинен демонструвати стабільні характеристики в умовах впливу високої напруженості електричного поля, широкий діапазон робочих температур, бути негорючими та пожежобезпечним. Однак рідких діелектриків, що задовольняють одночасно всім цим вимогам, у природі не існує. Тому при виборі рідкого просочуючого діелектрика для конкретного високовольтного імпульсного конденсатора визначальними факторами є тип діелектричної системи конденсатора, умови та режим його експлуатації.

Раніше в ІІІТ проводилися експериментальні дослідження щодо вибору типу просочуючої електроізоляційної рідини для різних комбінацій полімерного плівкового робочого діелектрика та оцінювалася його довговічність залежно від режимів експлуатації високовольтного імпульсного конденсатора [1,6]. У результаті цих досліджень було

отримано, що для якісного просочення плівкової діелектричної системи та забезпечення високих значень короткочасної та тривалої електричної міцності повинні бути задіяні малов'язкі неполярні діелектричні рідини.

В Україні при просоченні плівкових діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів знайшли широке застосування трансформаторні масла марок T-1500 ДСТУ 982-80 і ГК ТУ 38-401-358-84 виробництва фірми „APIAN”, Україна, які відносяться до мінеральних нафтових масел [1,8-11]. Електрофізичні та фізико-хімічні характеристики цих масел близькі, вони відрізняються один від одного головним чином походженням (родовищами нафти) та способами очищення. У європейських країнах для просочення діелектричних систем високовольтних електротехнічних пристроїв рекомендуються трансформаторні масла марок Nutral 10 XN і Nutral 11 GX виробництва фірми „NYNAS”, Швеція, які є аналогами олів марок T-1500 та ГК [12,13].

Конденсатори із просоченням високоочищеними (переочищеними) маслами, як показав досвід виробництва в ІППТ і на Дослідному заводі ІППТ, виходили з ладу частіше, ніж з тими, що містять великий відсоток природних антиокислювачів і компонентів, стійких до впливу електричного поля. Рідини з підвищеним вмістом ароматичних вуглеводнів мають підвищені окисну й електричну стійкості, меншу схильність до виділення газів при впливі на них електричних розрядів і мають більшу здатність до газопоглинання. Ароматичні вуглеводні є необхідною складовою частиною електроізоляційних нафтових масел. Їх кількісний і структурний склад багато в чому визначає фізико-хімічні та електричні характеристики рідкого діелектрика. Повне видалення ароматичних вуглеводнів з масла в процесі очищення призводить до зниження його стійкості проти окислювання (особливо при підвищеній температурі). У той же час, наявність великої кількості ароматичних вуглеводнів, особливо поліциклічних, підвищує значення тангенсу кута діелектричних втрат. Тому для кожного типу масла підбирається оптимальне співвідношення нафтових та ароматичних вуглеводнів.

Сумісність із твердими електротехнічними матеріалами відіграє вагомий роль при виборі масла, як просочуючого діелектрика [14]. Сталь, олово, олов'яно-свинцевий сплав, нікель, хром, кадмій мало змінюються самі та слабо впливають на рідину під час термоокислювального старіння. Мідь та мідні сплави інтенсивно кородують, є активними каталізаторами окислювання та значно підвищують тангенс кута діелектричних втрат. Інтенсивність корозії підвищується з підвищенням температури окислювання та пов'язана з хімічним складом рідини. Тому у просочених нафтовим маслом високовольтних електротехнічних пристроях, які розраховані на тривалий термін служби без його заміни, всі мідні

струмовідні частини лудять, цинкують або нікелюють.

Колір трансформаторного масла зазвичай солом'яно-жовтий та характеризує глибину очищення – чим глибше очищення, тим світліше масло. Відносна діелектрична проникність у нафтових масел низька та дорівнює приблизно 2,2 при 20 °С, з ростом температури до 90 °С знижується в середньому на величину від 3 % до 4 %. При частоті 50 Гц тангенс кута діелектричних втрат масла практично визначається провідністю та залежить від ступеня його очищення. Зі збільшенням температури тангенс кута діелектричних втрат лінійно зростає. Для технічно чистого масла пробивна напруга в стандартному розряднику становить від 50 кВ до 60 кВ при 50 Гц і 120 кВ при впливі імпульсів [15]. Одним з істотних недоліків трансформаторних масел є те, що зниження температури експлуатації масел у межах від плюс 20 °С до мінус 5 °С, при змінній або постійній напрузі, призводить до зменшення короткочасної електричної міцності, а подальше зниження температури від мінус 5 °С до мінус 45 °С викликає вже її зростання. Це пояснюється різним агрегатним станом води у маслі, утворенням кристалів льоду та зміною в'язкості.

Через горючість, неоднорідність властивостей, яка обумовлена неоднорідністю складу, недостатньо високу стійкість в електричному полі (з урахуванням сучасних вимог до високовольтного обладнання), виснаження традиційних джерел нафти, придатних для виготовлення електроізоляційних масел, намітилася тенденція заміни нафтових масел синтетичними вуглеводнями [10].

При створенні деяких типів конденсаторів, зокрема високовольтних імпульсних для електрогідроімпульсних пристроїв для збільшення дебіту нафтових і газових свердловин з розширенням діапазоном робочих температур експлуатації до 100 °С і вище, а також силових конденсаторів для електротранспорту вугільних шахт, де пред'являються підвищені вимоги з пожежної безпеки застосовуваного обладнання, становлять інтерес кремнійорганічні просочуючі рідини [16,17].

Рідкі кремнійорганічні рідини нетоксичні, екологічно безпечні, мають високу термоокислювальну стабільність і експлуатаційну надійність.

З кремнійорганічних рідин – як просочувальних діелектриків високовольтних імпульсних конденсаторів – найбільш широке застосування отримали поліметилсілоксанові рідини [8]. В'язкість цих рідин може коливатися в широкому інтервалі від 1 сСт до $1 \cdot 10^3$ сСт залежно від молекулярної ваги. Залежно від в'язкості збільшується густина рідин, величина її становить від 0,96 г/см³ до 0,99 г/см³.

Провідне місце в області вітчизняного виробництва поліметилсілоксанових кремнійорганічних рідин займає Запорізьке державне

підприємство „Кремнійполімер”, [18]. Поліметилсілоксанові рідини прозорі, безбарвні, хімічно інертні, корозійно стійкі, гідрофобні, мають гарні діелектричні та демпфіруючі властивості та є поверхнево-активними речовинами. Температура застигання поліметилсілоксанових рідин нижче мінус 60 °С, тому вони можуть використовуватися при робочих температурах від мінус 50 °С до плюс 200 °С. Зі збільшенням в'язкості рідин нижня межа робочих температур знижується від мінус 50 °С до мінус 40 °С, разом з тим, зі зростанням в'язкості рідин збільшуються їх електрична міцність та питомий об'ємний електричний опір.

Однак у виробництві високовольтних імпульсних конденсаторів, які призначені для експлуатації у нормальних кліматичних умовах та режимах з високою частотою проходження зарядів-розрядів, ці рідини не знайшли широкого застосування через свою незадовільну електричну міцність та низьку газостійкість [15].

Для просочення силових конденсаторів з робочим діелектриком на основі полімерних плівок широке застосування у світовій практиці високовольтного конденсаторобудування одержали такі синтетичні електроізоляційні рідини як JARILEC C101 виробництва фірми „Arkema”, Франція та фенілксилілетан (ФКЕ) виробництва фірми „Nippon Chemical Co”, Японія [16,19-22].

Діелектрична рідина JARILEC C101 являє собою суміш 75 % монобензілтолуолу і 25 % дібензілтолуолу. Рідина хімічно стабільна, має задовільну електричну міцність, стійка до перенапруг, має малу в'язкість і низьку температуру застигання, відноситься до класу помірно небезпечних речовин, екологічно сумісна. В ШПТ раніше проводилися експериментальні дослідження діелектричних рідин на основі суміші моно- і дібензілтолуолів і неодноразово надходили скарги від робочого персоналу на різкий запах цих рідин і симптоми алергії. Фірма „Arkema” признає той факт, що діелектрична рідина JARILEC C101 має сильний запах, який може негативно впливати на людей. Тому

цим виробником було створено діелектричну рідину JARILEC C101D, що є ароматизованим варіантом рідини JARILEC C101, де інтенсивність запаху знижена і стає задовільною [22].

Більш широке застосування, у порівнянні з JARILEC C101, для просочення плівкового діелектрика силових конденсаторів знайшов фенілксилілетан (ФКЕ) – синтетична вуглеводна ароматична речовина ряду діарілалкану [23]. Наприклад, Усть-Каменогорський конденсаторний завод, Казахстан виробляє силові конденсатори тільки із плівковим робочим діелектриком, просоченим фенілксилілетаном [24]. ФКЕ має найвищу газостійкість серед розглянутих синтетичних рідких діелектриків, стабільний та екологічно безпечний, стійкий до перенапруг, забезпечує зниження ймовірності виникнення часткових розрядів і має великий термін служби.

Раніше в ШПТ проводилися експериментальні дослідження тривалої електричної міцності різних діелектричних систем на основі полімерних плівок – полікарбонатної, поліетилентерефталатної і поліпропіленової [7]. У ролі просочуючих рідких діелектриків досліджувалися трансформаторне масло Т-1500, ФКЕ, поліметилсілоксанові рідини ПМС-10 і ПМС-20. Метою досліджень був вибір оптимальних діелектричних систем на основі комбінацій полімерних плівок і діелектричних рідин для виготовлення надійного робочого діелектрика високовольтних імпульсних конденсаторів. Експериментальні дослідження показали, що тип просочувальної рідини впливає на тривалу електричну міцність досліджуваних діелектричних систем - в однакових умовах випробувань зразки на основі поліпропіленової плівки, що були просочені ФКЕ, характеризувалися більш високим значенням короткочасної та тривалої електричної міцності в порівнянні з аналогічними зразками, просоченими трансформаторним маслом Т-1500 та поліметилсілоксановими рідинами ПМС-10 та ПМС-20.

Таблиця 1 – Характеристики малов'язких неполярних діелектричних рідин

Найменування	Страна-виробник	Густина, г/см ³	В'язкість, сСт		ε	tg δ (при 90 °С)	Електрична міцність, кВ/мм	Температура спалаху, °С
			при 20 °С					
Трансформаторне масло Т-1500	Україна	0,895	8,0 (50 °С)		2,2	0,005	30	135
Трансформаторне масло ГК			9,0 (50 °С)				32	135
Трансформаторне масло Nuro 10XN	Швеція		8,0 (40 °С)				28	140
Трансформаторне масло Nuro 11GX			11,0 (40 °С)				20	135
Поліметилсілоксанова рідина: ПМС-10	Україна	0,960	10	2,6	0,003 (150 °С)	18	170	
ПМС-20		0,974	20	2,6	0,003 (150 °С)	18	200	
ПМС-100		0,990	100	2,7	0,002 (150 °С)	19	300	
Фенілксилілетан	Японія	0,990	6,5	2,5	0,0003	31	148	
JARILEC C101	Франція	1,010	6,5	2,66	0,004 (t=100 °С)	35	144	

В [25] наведено результати експериментальних досліджень тривалої електричної міцності плівкових діелектриків, просочених нафтовими маслами, ФКЕ, JARILEC C101 та рідиною Миксофлекс 1000, виробництва фірми „Prodelec”, Франція. Було встановлено, що найбільшу електричну міцність має поліпропіленовий плівковий діелектрик, просочений ФКЕ, при цьому коефіцієнт варіації по електричній міцності діелектрика складає 2,4 %. За результатами експериментальних досліджень було зроблено висновок, що для просочення робочого діелектрика силових конденсаторів із поліпропіленовою плівкою найбільш перспективною є електроізоляційна рідина ФКЕ.

Основні характеристики розглянутих малов'язких неполярних діелектричних рідин, що отримали найбільш широке застосування для просочення плівкової ізоляції в сучасних високовольтних електротехнічних пристроях, представлено в табл. 1.

Висновки

Для просочення плівкового діелектрика високовольтного імпульсного конденсатора, що експлуатується у режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів, найбільш доречно застосувати фенілксилілетан.

Список літератури

1. **Гуцько, В. І.** Исследование конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов / **В. И. Гуцько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, С. О. Топоров, Т. А. Фещук** // *Электронная обработка материалов*. – 2012. – № 2. – С. 93-96
2. **Кучинский, Г. С.** Силовые электрические конденсаторы / **Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров**. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.
3. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. **Ю. В. Корицкого**. в 3т., Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
4. **Малюшевська, А. П.** Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля / **А.П. Малюшевська, В.І. Гуцько, С.О. Топоров** // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 1. – С. 12-17.
5. ТУ У 25.2-25093118-001. Плівки поліпропіленові двовісноорієнтовані. Технічні умови. Введ. 2001-12-19. – Луцьк: Волинський державний центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2001. – 27 с.
6. **Гребенников, И. Ю.** О повышении удельных характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов / **И. Ю. Гребенников, В. И. Гуцько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, И. С. Швеца** // *Электронная обработка материалов*. – 2004. – №5. – С.70 -74.
7. Высоковольтные бумажно-пленочные конденсаторы для повышения коэффициента мощности с экологически безопасными жидкостями (взамен трихлордифенила): отчет о НИР / ВНИИЦ. – М., 1987. – 51 с. – № ГР 02860098598.
8. **Гуцько, В. І.** Исследования по созданию гаммы высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / **В. И. Гуцько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, И. А. Перекупка** // *Материалы XV Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. – Николаев, 2011. – С. 201-203.
9. **Рудаков, В. В.** Высоковольтные импульсные конденсаторы разработки НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ» / **В. В. Рудаков, Н. И. Бойко, В. Д. Беспалов** // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Электротехника и преобразовательная техника»: сб. науч. тр.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – С. 47 – 58.
10. **Рудаков, В. В.** Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів / **В. В. Рудаков** // *Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Техніка та електрофізика високих напруг»:* зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПИ», 2009. – № 39. – С. 146-154.
11. **Гуцько, В. І.** Разработка высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / **В. И. Гуцько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, С. О. Топоров, И. А. Перекупка** // *Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Техніка та електрофізика високих напруг»:* зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 65-71.
12. Базовые и трансформаторные масла Nynas. – URL: www.nynas.com.
13. Область применения трансформаторных масел. – URL: http://www.sinopec.com/listco/en/products_service/lubricants/indu_lube/transformer_o/.
14. **Гуцько, В. І.** Исследование совместимости трансформаторного масла Т-1500 с конструктивными материалами / **В. И. Гуцько, А. Я. Дмитришин, С. О. Топоров, Т. А. Фещук** // *Электронная обработка материалов*. – 2006. – № 5. – С. 77-79.
15. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. **Ю. В. Корицкого**. в 3т., Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 386 с.
16. Физическая энциклопедия. Жидкие диэлектрики. – URL: http://femto.com.ua/articles/part_1/1170.html.
17. Виды жидких диэлектриков, свойства, область применения. – URL: <https://studopedia.org/8-90164.html>.
18. Запорожское государственное предприятие «Кремнийполимер»: каталог. – URL: www.silic.com.ua.
19. Пропитывающие диэлектрики. – URL: kvar.su/books/2/chap6.pdf.
20. Синтетические жидкие диэлектрики. – URL: lib.kstu.kz.8300/tb/books/materialovedenie/teory/3.2.3.html.
21. Синтетические жидкие диэлектрики. – URL: <http://studik.net/sinteticheskie-zhidkie-dielektriki/>.
22. JARYLEC C101, the most efficient dielectric oil for HV capacitors and capacitive HV equipment's. – URL: <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Jarylec-dielectric-fluids/2/>.
23. **Fofana, I.** 50 Years in the Development of Insulating Liquids / **I. Fofana** // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. – 2013. – Vol. 29, №5. – P. 13-25. – doi: 10.1109/MEI.2013.6585853.
24. Усть-Каменогорский конденсаторный завод: сайт предприятия. – URL: <http://www.ukkz.com>.
25. **Галахова, Л. И.** Электрические характеристики изоляции силовых конденсаторов промышленной частоты с пропиткой экологически безопасными жидкостями: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.12 «Техника высоких напряжений» / **Л. И. Галахова**. – URL: tekhnosfera.com/view/454825/a/#?page=1-21.

References (transliterated)

1. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishhenko, L. I., Toporov, S. O., Feshchuk, T. A.** Issledovanie konstruksij plenochnogo dielektrika dlya vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov [Investigation of film dielectric structures for high-voltage pulse capacitors]. *Elektronnaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry]*, 2012, **2**, 93-96.
2. **Kuchinskij G.S., Nazarov N.I.** Silovye elektricheskie kondensatory [Electric Power Capacitors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, 310.
3. Spravochnik po ehlektrotekhnicheskim materialam [Handbook of electrical materials] under redaction **Yu. V. Koritskij**. Vol. 2 Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 464.
4. **Malushevskaya, A. P., Gun'ko, V. I., Toporov, S. O.** Dvogotryvala elektrychna mitsnist' polimernykh plivok pod dieyu elektrychnogo polya [Long-term dielectric strength polymer films under an electric field]. *Elektrotehnika ta elektroenergetyka [Electrical engineering and power engineering]*, 2017, **1**, 12-17.
5. TU U 25.2-25093118-001. Plivky polipropilenovi dvovisnoorientovani. Tekhnichni umovy [Biaxial oriented polypropylene films. Specifications]. Lutsk, 2001, 27.
6. **Grebennikov, I. Yu., Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishhenko, L. I., Shvets, I. S.** O povyshenii udel'nykh kharakteristik i resursa vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov [On increasing the specific characteristics and life-time of high-voltage pulse capacitors] *Elektronnaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry]*, 2004, **5**, 70-74.
7. Vysokovol'tnye bumazhno-plenochnye kondensatory dlya povysheniya koefitsienta moshchnosti s ehkologicheski bezopasnymi zhidkostyami (vzamen trikhloridifenila) [High voltage paper-film capacitors to increase the power factor with environmentally friendly liquids (instead of trichlorobiphenyl)]. Report of ALL-UNION SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION CENTER no. ГР 02860098598. Moscow, 1987, 51.
8. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishhenko, L. I., Perekupka, I. A.** Issledovaniya po sozdaniyu gammy vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dielektrikom [Research on the creation of a range of high-voltage pulsed capacitors with a film dielectric]. *Materialy XV Mezhdunarodnoj shkoly-seminara «Fizika impul'snykh razrjadov v kondensirovannykh sredah» [Proc. of the XV Int. Conf. "Physics of Pulse Discharges in Condensed Media"]* Nikolaev, 2011, 201-203.
9. **Rudakov, V. V., Bojko, N. I., Bepalov, V. D.** Vysokovol'tnye impul'snye kondensatory razrabotki NIPKI «Molniya», NTU «KhPI» [High-voltage pulse capacitors developed by "Molniya" Scientific Research Institute, NTU "KhPI"]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series "Electrical Engineering and Conversion Technology"]*. Kharkov, NTU "KhPI", 2002, 47-58.
10. **Rudakov, V.V.** Stan ta tendentsiyi rozvytku vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatoriv [Status and tendencies of development of high-voltage pulse capacitors]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*. Kharkov, NTU "KhPI", 2009, **39**, 146-154.
11. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishhenko, L. I., Toporov, S. O., Perekupka, I. A.** Razrabotka vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dielektrikom [Development of high-voltage pulse capacitors with film dielectric]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series "High voltage engineering and electrophysics"]*. Kharkov, NTU "KhPI", 2012, 65-71.
12. Bazovye i transformatornye masla Nynas [Nynas. Base and transformer oils]. Available at: <http://www.nynas.com>.
13. Oblast' primeneniya transformatornykh masel [Scope of transformer oils]. Available at: http://www.sinopec.com/listco/en/products_service/lubricants/indu_lube/transformer_o/.
14. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Toporov, S. O., Feshchuk, T. A.** Issledovanie sovmestimosti transformatornogo masla T-1500 s konstruktivnymi materialami [Study of the compatibility of transformer oil T-1500 with structural materials]. *Elektronnaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry]*, 2006, **5**, 77-79.
15. Spravochnik po ehlektrotekhnicheskim materialam [Handbook of electrical materials] under redaction **Yu. V. Koritskij**. Vol. 1 Moscow, Energoatomizdat, 1986, 386.
16. Fizicheskaya entsiklopediya. ZHidkie dielektriki. [Physical Encyclopedia. Liquid dielectrics.]. Available at: http://femto.com.ua/articles/part_1/1170.html.
17. Vidy zhidkikh dielektrikov, svoystva, oblast' primeneniya [Types of liquid dielectrics, properties, scope]. Available at: <http://studopedia.org/8-90164.html>.
18. Zaporozhskoe gosudarstvennoe predpriyatie «Kremnijpolimer»: katalog [The State Enterprise "Kremnijpolymer": catalog]. Available at: <http://www.silic.com.ua>.
19. Propityvayushchie dielektriki [Impregnating dielectrics]. Available at: <http://kvar.su/books/2/chap6.pdf>.
20. Sinteticheskie zhidkie dielektriki [Synthetic liquid dielectrics]. Available at: <http://lib.kstu.kz.8300/tb/books/materialovedenie/teory/3.2.3.html>.
21. Sinteticheskie zhidkie dielektriki [Synthetic liquid dielectrics]. Available at: <http://studik.net/sinteticheskie-zhidkie-dielektriki>.
22. JARYLEC C101, the most efficient dielectric oil for HV capacitors and capacitive HV equipment's. Available at: <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Jarylec-dielectric-fluids/2/>.
23. **Fofana, I.** 50 Years in the Development of Insulating Liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2013, Vol. 29, **5**, 13-25, doi: 10.1109/MEI.2013.6585853.
24. Ust'-Kamenogorskij kondensatornyj zavod: sayt predpriyatiya. [Ust'-Kamenogorsk Capacitor Plant: official site]. Available at: <http://www.ukkz.com>.
25. **Galakhova, L. I.** Elektricheskie kharakteristiki izolyatsii silovykh kondensatorov promyshlennoj chastoty s propitkoj ehkologicheski bezopasnymi zhidkostyami [Electrical insulation characteristics of industrial-frequency power capacitors with impregnation with environmentally friendly liquids]. *Thesis of Ph. D. dissertation*. Available at: <http://tekhnosfera.com/view/454825/a/#?page=1-21>.

Відомості про авторів (About authors)

Гуцько Віктор Іванович – зав. сектором, ІПТ НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0003-1055-6304; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Viktor Gun'ko – head of sector, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1055-6304; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Дмитрішин Олексій Ярославич – молодший науковий співробітник, ІПТ НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0003-2420-9223; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Aleksey Dmitrishin – junior research assistant, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2420-9223; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Малюшевська Антоніна Павлівна – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, ІПТ НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0003-0703-6105; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Antonina Malushevskaya – senior research assistant, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0703-6105; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Топоров Сергій Олегович – провідний інженер, ІПТ НАН України, м. Миколаїв; ORCID: 0000-0002-5188-7380; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Sergey Toporov – lead engineer, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv; ORCID: 0000-0002-5188-7380; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Гуцько, В. І. Вибір діелектричної системи високовольтного імпульсного конденсатора, що призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів / **В. І. Гуцько, О. Я. Дмитрішин, А. П. Малюшевська, С. О. Топоров** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 86–92. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13.

Please cite this article as:

Gun'ko, V. I. , Dmitrishin, A. Ja. , Malushavskaya, A.P. , Toporov, S. O. Selection of the dielectric system of a high-voltage pulsed capacitor intended for operation in the mode with a high frequency of charge-discharge repetition. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 86–92, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гуцько, В. И. Выбор диэлектрической системы высоковольтного импульсного конденсатора предназначенного для эксплуатации в режиме с высокой частотой следования зарядов-разрядов / **В. И. Гуцько, А. Я. Дмитрішин, А. П. Малюшевская, С. О. Топоров** // *Вестник НТУ «ХПІ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 86–92. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13.

АННОТАЦІЯ Робота посвячена вибору діелектричної системи (твердий робочий діелектрик – рідкий пропитуючий діелектрик) для високовольтного імпульсного конденсатора, який експлуатується в режимі з високою частотою следования зарядів-розрядів. Вибір оптимальної системи для такого конденсатора потребував проведення аналітичного обзору застосовуваних в високовольтному конденсаторостроєнні діелектричних матеріалів. Так як високовольтний імпульсний конденсатор призначений для експлуатації з високою частотою следования зарядів-розрядів, то обзор виконувався виключно по неполярним діелектричним матеріалам, які мають по порівнянню з полярними більш ніж на порядок меншими діелектричними втратами, і одночасно високою електричною міцністю. Як матеріал твердого робочого діелектрика однозначно вибрано діелектрик на основі шарів тільки полімерної плівки. З полімерних плівок для робочого діелектрика вибрано поліпропіленову плівку, також розглянуті її діелектричні характеристики в залежності від місця і способу виробництва. В нашому випадку була вибрана поліпропіленова плівка українського виробництва, яка за своїми електрофізичними характеристиками не поступає плівкам провідних країн-виробників. При виборі рідкого пропитуючого діелектрика для плівочного робочого діелектрика розглядалися неполярні діелектричні рідкості, які мають малу кінематичну в'язкість. Розглянуті властивості малов'язких діелектричних рідкостей від провідних країн-виробників. Розглянуті характеристики рідких діелектриків на основі мінеральних масел, які тривало застосовуються в високовольтній техніці, однак горючість, неоднорідність характеристик, недостатньо висока електрична міцність в електричному полі привело до їх заміни на синтетичні рідкості. Розглянуті властивості кремнійорганічних рідкостей (в частині поліметилсилоксанів), синтетичних вуглеводородів (в частині суміші моно- і дибензилтолуолів (JARILEC C101) і фенілксилілэтана (ФКЭ)). Проведено порівняльну оцінку їх діелектричних характеристик. На основі проведеного аналізу дані рекомендації по використанню діелектриків для діелектричної системи високовольтного імпульсного конденсатора, який призначений для експлуатації в режимі з високою частотою следования зарядів-розрядів.

Ключові слова: плівочний діелектрик; поліпропіленова плівка; діелектрична пропитуюча рідкість; частота следования; високовольтний імпульсний конденсатор

Поступила (received) 27.09.2019