

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук, проф., НТУ «ХП»

СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Наведені стан та тенденції розвитку мало втратних високовольтних імпульсних конденсаторів

The condition and tendencies of development of small losses power of high voltage pulse capacitors are given

Силкові електричні конденсатори грають важливу роль при вирішенні проблем ресурсо- та енергозбереження. Відомо, наприклад, використання конденсаторів змінного струму для компенсації реактивної потужності електричних мереж та споживачів електричного навантаження [1]. Прогрес в розвитку силових конденсаторів змінної високої напруги перш за все пов'язано з використанням в якості твердого діелектрику двохвісіорієнтованої поліпропіленової плівки та синтетичної просочувальної рідини-фенілксилілетану [2]. Перспективними є розробки з використанням екологічно безпечних просочувальних рідин, які замінюють трихлордифеніл (токсично небезпечний та вилучений з виробництва у 80-х роках 20-го сторіччя): жарилек С101 та ДОН-3 (монодобензилтолуол), міксфлекс 1000 (диоктилфталат) [3]. Основною характеристикою конденсаторів, яка впливає на питомі показники, є робоча напруженість електричного поля. Для конденсаторів змінної напруги залежність робочої напруженості E (кВ/мм) від товщини діелектрику d , мм, має вигляд

$$E = Ad^{-0,5}, \quad (1)$$

де коефіцієнт A для плівкової ізоляції дорівнює: при просочені конденсаторним маслом – 6,1, міксфлексом 1000 – 7,4, фенілксилілетаном – 8,9; для паперово-плівкової ізоляції (67 % плівки) при просочені міксфлексом 1000 – 5,1, фенілксилілетаном – 7,2, жарилек С101 та ДОН-3 – 7,7. Використання паперово-плівкової ізоляції спричинено можливістю підвищити питому енергію за рахунок збільшення еквівалентної діелектричної проникності (відносна діелектрична проникність просоченого паперу у 1,5-2 рази вища за плівкову). В результаті вдалося підвищити робочу напруженість електричного поля з 14-16 кВ/мм, що притаманно для паперово масляних конденсаторів, до 40-45 кВ/мм для паперово-плівкових та до 49-51кВ/мм для плівкових конденсаторів [3]. Плівкові конденсатори до того ж мають суттєво менший тангенс кута діелектричних втрат, а значить і менші теплові втрати.

Починаючи з середини минулого сторіччя інтенсивно розвиваються ефективні імпульсні технології обробки матеріалів, які побудовані на ефекті накопичування енергії за тривалий час з подальшим її виділенням на навантаженні за короткий час, що на кілька порядків менший за час накопичування енергії [4]. До цих технологій відносяться магніто-імпульсна обробка металів [5],

отримання озону [6], технології з використанням електрогідралічного ефекту [7,8], на основі електроерозійної дії [9], КВІВ – технології [10], дослідження і створення потужних емнісних накопичувачів енергії [11]. Впровадження та удосконалення цих технологій дозволило суттєво покращити питомі характеристики обладнання в порівнянні з технологіями повільно-статичного навантаження, зменшити енергетичні витрати, покращити експлуатаційні показники технологічного обладнання та екологію довкілля, та отримати нові якісні ефекти.

Основним енергетичним вузлом устаткування для цих технологій є емнісний накопичувач енергії, який утворений з послідовно-паралельно з'єднаних високовольтних імпульсних конденсаторів. Базові технічні рішення і вимоги зі створення високовольтних імпульсних конденсаторів були засновані в 60-70 роках минулого сторіччя [12]. Оскільки вони мали менший ресурс ніж у конденсаторів змінної напруги і специфічні режими роботи, то принципи їх конструювання суттєво відрізнялися від методів розрахунку і створення конденсаторів змінної напруги. До імпульсних конденсаторів надаються наступні вимоги: максимальна питома накопичена енергія, необхідний ресурс (як звичай 10^4 - 10^6 циклів заряд-розряд), мала власна індуктивність (одиниці і десятки наногенрі), теплова стійкість при високій частоті слідування імпульсів, малі втрати енергії в розрядному режимі, висока динамічна стійкість з'єднань секцій всередині та виводів конденсатору, виконання конструкції корпусу та виводів в сприятному вигляді для розміщення і з'єднання з іншими елементами устаткування.

Вимоги високої питомої енергії відносяться практично до усіх типів імпульсних конденсаторів. Питома енергія активного об'єму

$$W_{num} = \varepsilon E^2 / 2 \quad (2)$$

визначається діелектричною проникністю ε діелектрику і пропорційна квадрату робочої напруженості електричного поля. Для виготовлення потужних силових імпульсних конденсаторів використовують діелектрик на основі конденсаторного паперу КОН-2, КОН-3М підвищеної густини відповідно 1,2 та 1,35 кг/м³, що забезпечує підвищену електричну міцність та відносну діелектричну проникність, але більший ніж у конденсаторів змінної напруги тангенс кута діелектричних втрат при просочені касторовим маслом [13]. В останні роки більше уваги стали приділяти використанню синтетичних плівок та відповідних просочувальних рідин. Добрі питомі характеристики отримані при використанні конденсаторної електротехнічної поліетилентерефталатної плівки ПЭТ КЭ [14] та поліпропіленової плівки [15-17] в тому числі в комбінації з конденсаторним папером при різних видах просочення касторовим та трансформаторним маслами, фенілксилілетаном, поліметилсилоксановою рідиною. В результаті відносна діелектрична проникність становить $\varepsilon = 2,3 - 5,4$ і суттєво підвищити питомі характеристики за рахунок ε є проблематичним. Крім того, чим більше ε , тим менше значення робочої напруженості електричного поля. Тому основним шляхом підвищення питомої енергії у відповідності з фор-

мулою (2) є підвищення робочої напруженості електричного поля.

Робоча напруженість визначається: короткочасною електричною міцністю ізоляції і тривалою міцністю або процесами руйнування діелектрику при роботі в імпульсному режимі. Основне значення при цьому мають тип використаного діелектрику та режим роботи конденсатору. На значення робочої напруженості основний вплив мають ресурс, надійність при заданому ресурсі, форма імпульсу в розрядному режимі (аперіодичний чи коливальний розряд), частота повторення імпульсів. Значення робочою напруженості більше ніж у конденсаторів змінної напруги, але менше короткочасної електричної міцності ізоляції. Прагнення підвищення напруженості електричного поля пов'язано з необхідністю зменшення ресурсу.

Для зразків конструкції поліпропілен-поліетилентерефталат (однієї з кращих плівкових систем) в роботі [17] отримано наступну емпіричну формулу залежності середньо статичного ресурсу M від основних діючих чинників

$$M = 9,347 \cdot 10^{21} E^{-7,025} f^{0,082} F^{-0,299} \Delta^{0,037} 10^{3,897 \cdot 10^{-3} T}, \quad (3)$$

де E – напруженість електричного поля кВ/мм, f – частота слідування імпульсів Гц, F – частота розрядного струму Гц, Δ – декремент коливань, T – температура в градусах Кельвіна.

Для зразків паперово кастрової ізоляції відомі дві аналогічні залежності для середньо статичного ресурсу [17]

$$M = 2,72 \cdot 10^{21} E^{-8} f^{0,21} F^{-0,237} \Delta^{1,165} 10^{2,73 \cdot 10^{-3} T}, \quad (4)$$

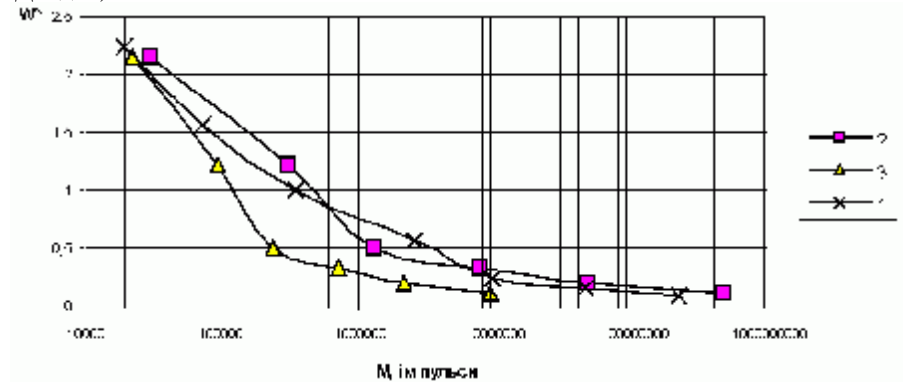
та [22]

$$M = 1,94 \cdot 10^{15} E^{-5} F^{-0,22} \Delta^{0,82} \quad (5)$$

де на відміну від (3) частота розрядного струму F в кГц, а інші чинники в тих же одиницях.

Тому для кожного типу діелектрику важливо встановити залежності напруженості електричного поля, а краще питомої енергії від ресурсу. Для більшості типів вітчизняних та закордонних конденсаторів 80-х років минулого сторіччя (паперові та паперо-лавсанові з просоченням кастровим маслом) питома енергія становила 50-100 Дж/дм³ при напруженості 70-100 кВ/мм [12]. Теоретичні граничні питомі характеристики для цієї ізоляції для близького до аперіодичного розряду (найбільш сприятливого) при ресурсі 10⁴ імпульсів, що розрахований за формулами (4-5), становлять 9-10 кДж/дм³ без врахування об'єму фольги, закраїн, надійності. Це значення питомої енергії розраховано за формулою (2) для напруженості 200 кВ/мм та відносної діелектричної проникності 5,4. Однак при напруженості 150 кВ/мм і більше суттєво зростає відсоток конденсаторів, які не витримують приймальні випробування. Крім того реальна питома енергія в десятки разів менша для усіх типів конденсаторів внаслідок необхідності використання фольги, допоміжних ізоляційних і конструктивних елементів, а також врахування статистичних характеристик (значне збільшення площі обклади) та надійності. На рисунку приведені залежності відно-

сної питомої енергії W^* паперово-кастрових (криві 2 і 3) та плівкових конденсаторів (крива 1) від ресурсу. Питома енергія W^* розрахована як відношення теоретичного значення енергії при різних значеннях напруженості до значення питомої енергії плівкового діелектрика (відносна діелектрична проникність 2,5) при напруженості 200 кВ/мм і значеннях чинників $f = 2$ Гц, $F = 20$ кГц, $\Delta = 11$, $T = 293$ К (теоретичне значення питомої енергії становить 4,4 кДж/дм³).



Залежність W^* від M для слабко затухаючого коливального розряду:
1 – за формулою (3), 2 – за формулою (4), 3 – за формулою (5)

Подальші дослідження паперово-кастрових конденсаторів пов'язані з удосконаленням конструкцій, покращанням технології виготовлення. Ці заходи можуть незначно збільшити приведені на рис. граничні питомі характеристики. Однак, ці конденсатори залишаються конкурентноздатними та привабливими з точки зору ціни та якості для ресурсу 10⁴–10⁶ імпульсів і більше. Тому дослідження в напрямку удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з просоченням кастровим маслом є актуальними і в наш час і визначають тенденцію їх удосконалення. Так в роботах [19, 20] досліджено вплив товщини паперо-кастрової ізоляції на ресурс та розроблено методику порівняльного аналізу, що дозволило удосконалити конструкції конденсаторів з послідовно з'єднаними секціями, збільшити ресурс, зменшити індуктивність і ціну. В роботі [21] представлено результати дослідження оригінального конденсатору з паперо-лавсановою ізоляцією, яка просочена кастровим маслом. Конденсатор імпульсно заряджається до 200 кВ. Ємність конденсатору становить 1,5 нФ, а індуктивність не більше 20 нГн при робочій напруженості 140 кВ/мм. Конструктивно введені допоміжні обкладки, які розташовані зі зміщенням та мають загнуті по периметру крайки, що послаблює крайовий ефект шляхом ділення ізоляції на тонкі шари. Досягнуто ресурс 2x10³ імпульсів при питомої енергії 100 Дж/дм³. В роботі [16] проведено дослідження характеристик трьох типів ізоляції: паперо-лавсанової, паперо-поліпропіленової, паперо-фторопластової, які просочені кастровим маслом. На основі цих типів ізоляції

створені відповідно конденсатори з енергозапасом 112,8 Дж, 72,8 Дж та 72,8 Дж на напругу 50 кВ. При більших значеннях накопиченої енергії паперолавсановий конденсатор має більші втрати при розряді. Автори рекомендують конструкцію паперо-поліпропіленового конденсатора, який просочений касторовим маслом, з робочою напруженістю електричного поля 160 кВ/мм та ресурсом 4×10^3 імпульсів при реверсі напруги 10 %. Таким чином, бажання звеличити робочу напруженість електричного поля до 140-160 кВ/мм для паперової і комбінованої ізоляції, що просочена касторовим маслом [16, 21], на практиці звертається зменшенням ресурсу (менше чим 10^4 імпульсів). Перехід від коливального режиму розряду ($\Delta \rightarrow 1$) до аперіодичного ($\Delta \rightarrow \infty$) приводить до збільшення ресурсу, як показали ресурсні випробування, не більше, чим на 2 порядки. Дослідження з удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з просоченням касторовим маслом є актуальними і в наш час. Так отримані позитивні результати використанню касторового масла при підвищених температурах та тиску, що важливо для створення конденсаторів, які працюють в заглиблених пристроях (наприклад, з метою підвищення дебету нафтових свердловин) [23]. Показано, що електрична міцність підвищується в 1,85 рази при 100 °С та тиску $3 \cdot 10^5$ Па. Таким чином, досягнутий рівень питомої енергії високовольтних імпульсних конденсаторів з просоченням касторовим маслом при ресурсі $10^4 - 10^5$ імпульсів становить 100-160 Дж/дм³ [23].

Одночасно з тенденцією удосконалення конденсаторів, які просочені касторовим маслом, стає актуальною тенденція удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів шляхом переходу на чисто плівкові конденсатори з просоченням різними діелектричними рідинами. Ця тенденція явилася результатом прогресу, який досягнуто в виготовленні більш якісних плівкових матеріалів з шорсткою поверхнею. Це дозволило проводити якісне просочення без паперового діелектрику. Крім того, використано накопичений досвід створення плівкових конденсаторів змінної напруги. Основною перевагою використання плівкової ізоляції є можливість суттєвого зменшення товщини діелектрику між обкладками шляхом зменшення кількості шарів плівки до 2-3 в зрівнянні з паперовими, де оптимальна кількість шарів паперу становить 5-8. До цього ж тривала електрична міцність плівкового діелектрику в 1,5-2,5 рази вища [3]. Ця перевага забезпечена практично відсутністю струмопровідних включень на 1 м² плівкових діелектриків і високою короткочасною електричною міцністю плівки. Аналіз рис. показує, що питома енергія плівкових конденсаторів знаходиться на рівні кращих зразків паперово-касторових конденсаторів, а плівкові конденсатори поступово змінюють імпульсні паперові конденсатори.

Всеросійським електротехнічним інститутом сумісно з фірмою «Русская технологическая группа 2» проведені роботи зі створення високовольтних імпульсних конденсаторів на основі поліетилентерефталатної плівки, яка просочена фенілксилілетаном [14]. Результати досліджень, що проведені автором [14], дозволили встановити ряд вимог до удосконалення технології виготов-

лення плівкових імпульсних конденсаторів: пресування в пакеті при оптимальних значеннях механічного тиску; намотування секцій в чистому приміщенні з метою виключення допоміжного забруднення плівки; перехід до індивідуального методу просочення і виключення повторного використання просочувальної рідини; старанне вакуумне сушіння на протязі 48 годин при температурі 95-105 °С; відмова від використання стабілізуючих епоксидних добавок. На основі цієї ізоляції створена серія імпульсних конденсаторів з плівки ПЕТ КЕ з питомою енергією 0,1, 0,2 та 0,3 Дж/г. Серія нараховує 32 типорозміри на напругу від 5 до 200 кВ і ємністю від 0,1 до 240 мкФ. Приведено приклад розробленого конденсатору КПИМ-50-6,6 на напругу 50 кВ і ємністю 6,6 мкФ з питомою енергією 0,3 Дж/г зі строком служби $9 \cdot 10^3$ імпульсів. Однак, не вказано режим роботи і надійність при такому ресурсі, що викликає деякі сумніви відносно серійного випуску такого типу конденсатору з такими високими питомими характеристиками. В роботі [25] приведена емпірична формула для визначення ресурсу цієї ізоляції від робочої напруги, температури, декременту коливань, часу заряду.

В інституті імпульсних процесів і технологій АН України (м. Миколаїв) досягнуті питомі енергії у кращих конденсаторів 135 і 181 Дж/дм³ при напрузі відповідно 100 і 6 кВ та ресурсі $6 \cdot 10^4$ і $2 \cdot 10^3$ імпульсів при розрядах близьких до аперіодичних. При цьому використана комбінована паперо-плівкова ізоляція товщиною 50-60 мкм з вмістом лавсанової плівки 50-60 %. Відзначається доцільність переходу на менші тонкі шари ізоляції 22-38 мкм, що сприяє підвищенню ресурсу, однак з більшими значеннями відхилень ресурсу [24]. За останні роки колектив цього інституту провів дослідження зі створення високовольтних імпульсних конденсаторів з різними видами полімерної ізоляції і просочених неполярною діелектричною рідиною. Отримані емпіричні залежності ресурсу для поліпропіленового, комбінованого поліпропілену – поліетилентерефталатного, полікарбонатно- поліетилентерефталатного діелектрика, які просочені фенілксилілетаном, трансформаторним маслом Т-1500, поліметилсилоксановою рідиною ПМС-10 від напруженості електричного поля, частоти слідування імпульсів, частоти розрядного струму і декременту коливань. Випробування проведені при робочих напруженостях 173,6-183,8 кВ/мм. Досягнуті високі значення ресурсу порядку $(4-6) \cdot 10^5$ імпульсів на зразках секцій в режимі близькому до аперіодичного. Це відповідає теоретичному значенню питомої енергії в об'ємі активного діелектрику 350 Дж/дм³. Але значення питомої енергії для реально виготовленого погрузного плівкового конденсатору за даними тих же авторів не перевищує 60 Дж/дм³. Практично не виявлено великої різниці між значеннями ресурсу для вказаних видів просочення неполярною рідиною. Просочення полімерної ізоляції традиційною полярною рідиною – касторовим маслом приводить до різкого зниження ресурсу [26]. Враховуючі велике значення впливу властивостей просочувальних рідин на ресурс конденсаторів значна увага приділяється їх дослідженню, в тому чи-

слі в взаємодії з полімерними діелектриками [23, 27, 28]. Наголошується на необхідності удосконалення методів очищення діелектричних рідин, сушіння і дегазації. Значно менший вплив на ресурс роблять різні домішки, такі як епоксидні та поверхньоактивні добавки [14, 29]. Так, наприклад [27], сушіння і дегація трансформаторного масла Т-1500 приводить до підвищення електричної міцності масла з 8 кВ/мм до 34 кВ/мм. Очищення фулеровою землею або активним окислом алюмінію приводить до підвищення електричної міцності масла з 34 кВ/мм до 35-36 кВ/мм.

Оскільки за останній час посилилась зацікавленість у використанні різних комбінацій діелектриків, виникла потреба в розрахунку електричного поля конденсаторних конструкцій з різними діелектриками. Особливо в крайових зонах з урахуванням електрофізичних якостей діелектриків, що визначило *тенденцію* більш поглибленого дослідження впливу розподілення електричного поля на ресурс імпульсних конденсаторів. В 90-х роках минулого сторіччя розроблено феноменологічну теорію руйнування конденсаторної ізоляції [30]. В основу теорії положено концепцію зворотно пропорційної залежності ресурсу від об'єму ізоляції, в якому напруженість електричного поля перевищує деяку критичну величину. На основі аналізу розподілення електричних полів, знайденого методом конформних відображень, та концепції «напруженого об'єму» отримано вирази для ресурсу в залежності від геометричних розмірів, форми торця обкладки, що дало змогу проводити прогнозування ресурсу до проведення випробувань. Подальший розвиток теоретичних розрахунків пов'язано з необхідністю урахування значень діелектричних проникностей і їх впливу на розподіл електричного поля. В роботах [31, 32] приведені результати чисельних розрахунків напруженості електричного поля поблизу скошеного краю обкладки з урахуванням шарів діелектрику та їх діелектричних проникностей. Розрахунки проведені методом граничних інтегральних рівнянь з оцінкою похибки розрахунків не більше 5 %. Дані рекомендації щодо вибору вузлів інтегрування при апроксимації границь розрахункової моделі відрізками з кусочно-постійними значеннями щільності зарядів. Показано, що найбільшу питому енергію мають конструкції з комбінованим діелектриком з мінімальним вмістом діелектрику, що має більшу діелектричну проникність та розташований біля обкладок. Надані пропозиції щодо спрощення урахування числа шарів при їх значній кількості.

Висновки.

1. Аналіз результатів досліджень в галузі створення високовольтних силових конденсаторів виявив такі тенденції їх розвитку: це тенденція створення чисто плівкових поліпропіленових конденсаторів змінної напруги з просоченням переважно фенілксилілетаном; тенденція удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з паперовою або комбінованою ізоляцією, що просочені касторовим маслом, переважно для роботи в пристроях з тривалим ресурсом; тенденція створення високовольтних імпульсних конденсаторів з під-

вищеною питомою енергією з плівкової ізоляції (поліетилентерефталат та поліпропілен), що просочена неполярними діелектричними рідинами, та поліпшення якості цих рідин; тенденція дослідження впливу розподілення сильних електричних полів на ресурсні характеристики конденсаторної ізоляції та розробка методів прогнозування ресурсу за результатами досліджень.

2. Максимальні значення питомої енергії сучасних високовольтних імпульсних конденсаторів становлять 200-300 Дж/дм³ при ресурсі до 10⁴ імпульсів в найсприятливіших умовах експлуатації.

3. В Україні розробкою та виготовленням високовольтних імпульсних конденсаторів займаються науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХП» (м. Харків) та інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв). Також виробляються вітчизняні діелектричні матеріали: поліпропіленова плівка (м. Луцьк) та конденсаторний папір (м. Малин Житомирської області).

Список літератури: 1. Зорін В.В. Функціонування та розвиток систем електропостачання міст // Науковий вісник: Енергетика та ресурсозбереження. – № 6 (32). – Харків: НТУ «ХП», 2008. – С. 33-46. 2. Галахова Л.Н. Косинусные высоковольтные конденсаторы с чисто пленочным диэлектриком и пропиткой экологически безопасными жидкостями // Электротехн. пром-ть: Сер. 04: Информациа. – М.: Информэлектро, 1988. – Вып. 4. – С. 1-8. 3. Кучинский Г.С., Галахова Л.Н. Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными диэлектриками // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 33-38. 4. Баранов М.И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 42-54. 5. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с. 6. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Использование импульсного коронаго разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 4. – С. 64-65. 7. Жекул В.Г., Барбашова Г.А., Дубовенко К.В. и др. Электрические и гидродинамические характеристики разряда при импульсной обработке водяных скважин // Вісник Національного технічного університету «ХП» «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХП», – 2004. – № 35. – С. 197-203. 8. Попова И.В., Маринин А.И., Укряинец А.И. и др. Получение фруктово-олигосахаридных смесей с помощью электроимпульсных технологий // Электронная обработка материалов. – 2007. – № 2. – С. 60-66. 9. Монастирський Г.Е., Шпак А.П., Коломийцев В.І., Шерба А.А. та ін. Дослідження стану порошоків, отриманих електроіскровим методом із сплавів з мартенситним перетворенням // Металознавство і новітні технології. – 2003. – Т. 25, № 6. – С. 803-816. 10. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтные установки и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // Вісник Національного технічного університету «ХП» «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХП», – 2004. – № 35. – С. 54-63. 11. Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 5. – С. 48-60. 12. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с. 13. Рудаков В.В., Кравченко В.П. Пути улучшения удельных характеристик высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХП» «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХП», – 2001. – № 16. – С. 102-105. 14. Ермилов И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // Электричество. – 2006. – № 9. – С. 73-79. 15. В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 20. – С. 167-174. 16. Саушкин А.В., Жарова Н.В., Ким А.А. и др. Малогабаритный низкочастотный конденсатор с импульсной зарядкой на 200 кВ // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 4. – С. 91-95. 17. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др. Исследование зависимости

ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режима эксплуатации // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 38-41. **18.** Рудаков В.В., Беспалов В.Д., Золотухин А.Н., Дубийчук О.Ю. Надежность и удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Техническая электродинамика. Тематический выпуск. Проблемы современной электротехники. Частичка 6. – 2002. – С. 89-93. **19.** Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Крамчанин Е.Г. и др. Особенности конструирования высоковольтных импульсных конденсаторов с последовательным соединением секций // Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 119-127. **20.** В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук. Выбор рациональной конструкции высоковольтных импульсных конденсаторов с последовательным соединением секций // Материалы 13-й Международной научной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (Август 2007). – Николаев, 2007. – С. 130-131. **21.** Жарова Н.В., Ратахин Н.А., Саушкин А.В. и др. Быстрый вывод энергии из высоковольтного импульсного конденсатора с помощью псевдоискрового разрядника // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 3. – С. 96-99. **22.** Расчет эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов / Б.П. Беленький, П.Н. Бондаренко, М.Э. Борисова и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с. **23.** Гунько В.И., Онищенко Л.И., Гребенников И.Ю. и др. Исследование влияния повышенных температур и давления на электрическую прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 59-61. **24.** Онищенко Л.И., Гунько В.И., Гребенников И.Ю. и др. Емкостные накопители энергии для электрофизических устройств различного назначения // Электротехника. – 2001. – № 8. – С. 55-57. **25.** Ермилов И.В. Современные импульсные конденсаторы с пленочным диэлектриком // Электронные компоненты. – 2005. – № 4. **26.** В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 113-118. **27.** Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др. Исследование способов очистки трансформаторного масла для пропитки высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком // Электротехника. – 2007. – № 1. – С. 25-27. **28.** Андреев А.М., Канискин В.А., Полонский Ю.А. Исследование старения электроизоляционных материалов силовых кабелей и конденсаторов // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 39-44. **29.** Беспалов В.Д., Рудаков В.В., Кашицкая Ю.В. и др. Исследование бумажно-пленочного диэлектрика, пропитанного касторовым маслом с добавкой поверхностно-активного вещества // Вісник національного технічного університету «ХПІ» «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 7. – С. 58-63. **30.** Рудаков В.В. Механизм разрушения конденсаторной изоляции // Техническая электродинамика. – 1998. – № 6. – С. 10-15. **31.** Кравченко Ю.В., Рудаков В.В. Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с произвольным наклоном грани торца // Техническая электродинамика. Тематический выпуск. – 2008. – Ч. 4. – С. 129-132. **32.** В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, В.О.Лысенко. «Краевой эффект» у скошенного края электрода // Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 34. – С. 85-92.

Надійшла до редколегії 09.10.2009

УДК 621.317.3

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук, проф., НТУ «ХПІ»;
А.И.КОРОБКО, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПІ»;
А.А.КОРОБКО, студент, НТУ «ХПІ»

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ЭМУЛЬСИЯХ ТИПА МИНЕРАЛЬНОЕ МАСЛО – ВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭМУЛЬСИИ ИНЖЕНЕРНОГО ТИПА

В статті наведені результати експериментальних досліджень діелектричного метода визначення вмісту води в емульсіях типу мінеральне масло – вода з використанням електрофізичної моделі емульсії інженерного типу.

In article results of experimental researches of a dielectric method of definition of moisture content in type mixes mineral oil – water with use of electrophysical model of a mix of engineering type are stated.

Цель работы. Экспериментальная проверка корректности диэлектрического метода определения влагосодержания, базирующегося на инженерной методике определения электрофизических характеристик эмульсии типа минеральное масло – вода.

Экспериментальная часть. Для проверки корректности инженерного подхода к разработке диэлектрического метода определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода, описанного в статье данного сборника: В.В.Рудаков, А.И.Коробко, А.А.Коробко «Электрофизическая модель эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа» была проведена его экспериментальная проверка.

При этом проводились исследования на эмульсии типа трансформаторное масло – вода.

Для проведения экспериментальных исследований по определению влагосодержания в данной эмульсии был использован диэлектрический метод [1], базирующийся на определении зависимости от объемного содержания воды к общему объему эмульсии диэлектрической проницаемости $\epsilon_{эм}$.

Для определения $\epsilon_{эм}$ был разработан измерительный комплекс, блок – схема, которого представлена на рис.1.

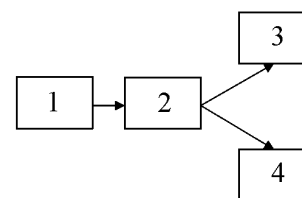


Рисунок 1 –Блок-схема измерительного комплекса

В состав измерительного комплекса входят:

- измерительный преобразователь 1 емкостного типа;
- измерительный генератор 2;
- средства измерения и контроля, электронный частотомер 3 (ЧЗ-34) и электронный осциллограф 4 (С1-55).

Общий вид измерительного комплекса представлен на рис. 2.