

М. П. ЛАБЗУН, канд. техн. наук, инженер, Юго-западная электроэнергетическая система, Винница;

П. Д. ЛЕЖНЮК, д-р техн. наук, профессор, Винницкий Национальный технический университет;

А. Е. РУБАНЕНКО, канд. техн. наук, доцент, Винницкий Национальный технический университет;

В. В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ОТКАЗЫ КОНДЕНСАТОРОВ СМА -166/ 3-14 В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГОСИСТЕМЕ УКРАИНЫ

Приведены результаты исследования и причин ухудшения изоляционных свойств и показателей надежности высоковольтных конденсаторов связи СМА-166/ $\sqrt{3}$ – 14УХЛ1.

Ключевые слова: высоковольтный конденсатор связи, показатели надежности, полипропиленовая изоляция, конденсаторное масло.

Введение. По мере развития электроэнергетических систем, увеличения напряжения и протяженности высоковольтных линий электропередач, оснащения их устройствами высокочастотной релейной защиты и противоаварийной автоматикой, возникает необходимость в надежной диспетчерской и административно-хозяйственной связи между электрическими станциями и подстанциями, в передаче сигналов телемеханики, противоаварийной автоматики и релейной защиты (передачи дискретных команд ускорения и блокировки защит, передачи токового сигнала дифференциальной фазной защиты линий), аварийного отключения высоковольтных выключателей, автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии и других данных. Одним из видов используемого при этом оборудования, являются высоковольтные **конденсаторы связи (КС)**, которые пропускают сигналы высокой частоты по каналам связи, либо используются для присоединения аппаратуры связи к линиям электропередачи и грозозащитным тросам.

Конденсаторы связи предназначены для обеспечения высокочастотной связи на частотах 24 – 1500 кГц в линиях электропередач номинальным напряжением 35 – 750 кВ. На основе высоковольтных конденсаторов делаются измерительные устройства (делители, не резонирующие трансформаторы напряжения) – для измерения напряжений ЛЭП, а также устройства отбора мощности для питания измерительной аппаратуры и силового оборудования. Учитывая важность задач, решаемых с использованием КС, к их показателям надежности предъявляются высокие требования. Так, например, средний срок эксплуатации КС типа СМА-166/ $\sqrt{3}$ –14 УХЛ1, в соответствии с паспортными данными, со-

ставляет 25 лет, а вероятность безотказной работы – 0,9.

Цель настоящей работы – выяснение возможных причин ухудшения характеристик изоляции секций конденсаторов, не выработавших свой ресурс.

Проведенный анализ показателей эксплуатационной надежности КС свидетельствуют о том, что в октябре 2013 года в Юго-Западной электроэнергетической системе (ЮЗЭС) Украины выявлено и выведено из эксплуатации 12 из 30 имеющихся КС типа СМА-166/ $\sqrt{3}$ –14 УХЛ1, 2008 года выпуска, производства ООО «УККЗ» (Усть-Каменогорский конденсаторный завод, Казахстан), которые имеют неудовлетворительные изоляционные характеристики (возрастание емкости и тангенса угла диэлектрических потерь). Поэтому такой показатель надежности, как вероятность безотказной работы КС СМА-166/ $\sqrt{3}$ –14 УХЛ1 с 0,9 фактически снизился до 0,6 за 4-5 лет (с 2009 года ввода в эксплуатацию) использования КС по прямому назначению.

Исследуемые конденсаторы связи находились в эксплуатации на высоковольтных (линейное напряжение 330 кВ) воздушных линиях электропередач, например, связывающих ОРУ 330 кВ Днестровской ГЭС-1 с ОРУ 330 кВ подстанции «Каменец-Подольская 330 кВ». По результатам предварительных испытаний все конденсаторы данной партии имели отклонения от паспортных значений емкости не более 1 %, а значения тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$ не превышали 0,07 %. За несколько лет эксплуатации параметры двенадцати конденсаторов превысили нормативные значения. Так у одиннадцати КС параметры ухудшились до значений в диапазонах: $tg \delta = 0,24–0,79$ %; $\Delta C = 16–93$ %; а в одном – при $tg \delta = 0,48$ % изменение емкости составило: $\Delta C = 235$ % (емкость КС увеличилась с 14 нФ до 46 нФ). Известно, что емкость каждого исправного конденсатора составляет около 14 нФ. Произвольно выбранные для диагностики несколько из поврежденных конденсаторов были разобраны и исследованы для выявления дефектов. Выемная часть каждого конденсатора состоит из 6 стянутых в стопку пакетов с помощью двух гетинаксовых планок, и размещена в фарфоровом корпусе с металлическими фланцами. КС пропитан предположительно конденсаторным маслом. В каждом пакете содержится 18 последовательно соединенных секций. Размер плоско-мотанной секции составил 140×190мм при толщине секции около 8 - 9 мм. Обкладки выполнены из алюминиевой фольги толщиной 9 мкм и шириной 120 мм. Изоляция выполнена из 4 слоев полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм каждая. Длина намотки изоляции составляет 16 метров. Расчетное значение емкости совпадает с измеренным значением емкости здоровой секции. При вскрытии дефектных секций, емкость которых не соответствует паспортным данным (в большинстве равна нулю) обнаружено повреждение до 50 % секций в виде видимых следов сквозного или ниточного внутреннего пробоя изоляции (рис. 1) и в виде пробоя по поверхности в средней торцевой части секции (рис. 2), конструктивно примыкающей к стяжной гетинаксовой планке (на рис. 2, планка отсутствует), стягивающей пакет секций по высоте.



Рисунок 1 – Следы пробоев внутри секций (слева сквозной – поз. 1, справа – ниточный, следы побежалости – поз. 2)

Также при размотке внутри секций наблюдались участки со следами коричневого налета (следов побежалости) на поверхности слоев пленки. Причем места ниточного пробоя располагались как в местах следов налета, так и в зонах без видимых загрязнений слоев пленки. Нижняя группа секций в разобранных конденсаторах не была повреждена. Наибольшее количество поврежденных секций находились на второй сверху группе секций, что наблюдалось и при термографическом исследовании в процессе эксплуатации (рис. 3) на двух последовательно включенных конденсаторах связи.



Рисунок 2 – Торцы 2-х секций с зоной почернения в средней части на участке контакта с гетинаксовой планкой

Результат термографического анализа подтверждается результатами вскрытия 2 дефектных КС и их разборки одного в ВНТУ и другого в ЮЗЭС. Так в разобранном в ВНТУ конденсаторе количество пробитых секций в каждом пакете, начиная с первого сверху, составило 14, 15, 10, 10, 2, 0 (рис. 4). В средних группах количество пробитых секций не превышало 10. Необходимо отметить, что даже при таком количестве пробитых секций (51 секция) КС сняты с эксплуатации по причине увеличения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь выше паспортных значений, хотя номинальное напряжение еще выдерживали. При этом на здоровых секциях напряжение превышало номинальное практически вдвое, что свидетельствует о высоком ка-

честве пленки. Увеличение тепловыделения в пакетах с большим количеством дефектных секций вызвано, на наш взгляд, увеличением тангенса угла диэлектрических потерь и сопротивления канала пробоя дефектных секций.

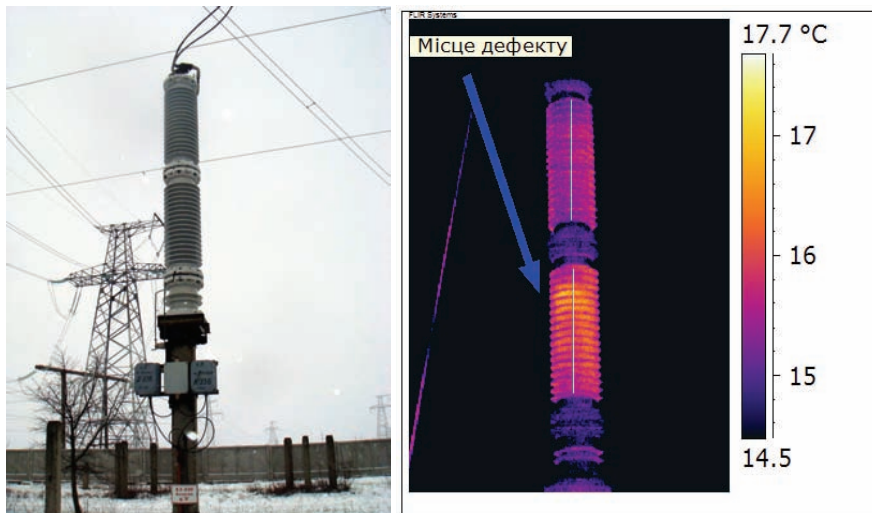


Рисунок 3 – Два КС на подстанции и термограмма КС в эксплуатации



Рисунок 4 – Зависимость емкости пакета от номера пакета

Одной из возможных причин пробоя является применение некачественных гетинаксовых планок, стягивающих пакет из шести последовательно соединенных пакетов секций. На это указывает область почернения на торцевой поверхности секции в месте контакта с гетинаксовой планкой. Так федеральная сетевая компания единой энергетической системы России отмечает, что по результатам внеочередных испытаний забракованы КС на двух ВЛ 500

кВ (отклонение емкости и тангенса выше допустимых норм). Причина повреждения является заводской брак – применение некачественного гетинакса в КС типа СМА (В)-166/3-18УХЛ1 и типа СМА (В)-166/3-14УХЛ1 поставки 2007 г. Проведена полная замена более 100 КС [2]. Второй возможной причиной является неравномерное распределение напряжения по последовательно соединенным пакетам секций вследствие допустимого отклонения значений емкостей и различной степени запрессовки пакетов секций [3]. При последовательном соединении секций общая емкость конденсатора составит

$$C_k^{-1} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}, \quad (1)$$

где C_k – емкость конденсатора; C_i – емкость или i -той последовательно-соединенной секции (при $n = 108$) или i -го последовательно соединенного пакета (при $n = 6$).

Напряжение на i -той секции будет равно:

$$U_i = \frac{U_0 C_k}{C_i} = \frac{U_0}{C_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}}. \quad (2)$$

Для предельного распределения напряжения, когда в конденсаторе из n последовательно включенных пакетов секций ($n-1$) последовательно включенные емкости равны между собой и превышают номинальное значение емкости на k_1 %. А n -я емкость меньше номинальной на k_2 %. Тогда напряжение на n -той емкости составит:

$$U_n = \frac{U_0(1+0,01k_1)}{(n-1)(1-0,01k_2)+1+0,01k_1}. \quad (3)$$

А коэффициент перенапряжения η на n -той секции будет равен:

$$\eta = \frac{U_n}{U_0} = \frac{nU_n}{U_0} = \frac{n(1+0,01k_1)}{(n-1)(1-0,01k_2)+1+0,01k_1}. \quad (4)$$

Например, для 3^x вариантов соединения секций: $k_1 = 20$ %, $k_2 = 5, 10, 15, 20$ %; $k_1 = 10$ %; $k_2 = 5, 10, 15, 20$ %; $k_1 = 0$ %; $k_2 = 5, 10, 15, 20$ % результаты расчета в виде кривых зависимостей $\eta = f(n)$ приведены на рис. 5. В реальных конструкциях СК СМА–166/√3 – 14УХЛ1 (значение $n = 6$ для числа последовательно соединенных пакетов секций, а суммарное количество элементарных последовательно включенных секций составит 108). На рис. 5 приведены результаты расчета для $n \leq 20$. Кроме того, коэффициент перенапряжения увеличивается незначительно при увеличении n более 20. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5, показывает, что при указанных значениях допусков на емкость (20 %) возможны перенапряжения на одном из 6 пакетов конденсатора, превышающие номинальные значения от 1,2 до 1,4 раз. По результатам обследования реальных секций определено значения емкостей элементарных здоровых секций и групп двух дефектных конденсаторов. Емкость каждой из непробитых элементарных секций соответствует паспортно-

му значению 1,43-1,45 мкФ, что соответствует емкости всего конденсатора, равной 13,4 мкФ, из 108 последовательно соединенных секций. Отклонение по значению емкости каждой секции не превышает 1,5 %, что согласно рис. 5 не может быть причиной дефекта конденсатора вследствие низкого уровня перенапряжений. Действительно, если даже емкость одной из шести последовательно включенных групп секций меньше на 1,5 %, чем каждой из других пяти, то по формуле (4) коэффициент перенапряжения η составит 1,013. Воспользовавшись известной зависимостью ресурса M от напряженности электрического поля E [4]:

$$M \sim E^{-\beta_1}, \quad (5)$$

где $\beta_1 = 5 \div 8$ при разрушении диэлектрика у края обкладок, найдем, что уменьшение ресурса будет незначительным, даже меньше, чем в η^8 , что составляет менее 10 %.

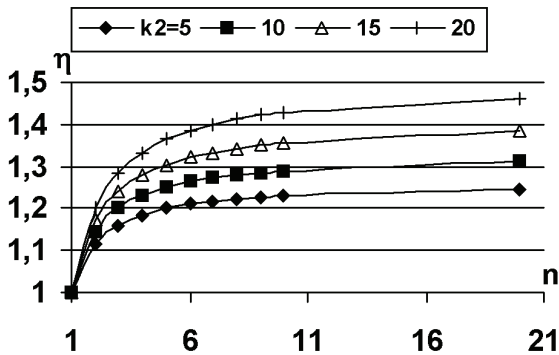


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента перенапряжения η от количества последовательно включенных секций при $k_1 = 20$ %

Таким образом, анализ результатов показал, что при таком большом числе последовательно соединенных секций влияние допуска по емкости будет незначительным и не может привести к пробую.

Причинами отказов могут быть: попадание влаги через уплотнительные резиновые кольца между верхним фланцем и корпусом, недопропитка пленочной изоляции между слоями (небольшие пузырьки воздуха между слоями пленки), наличие отдельных пупырышек (от частиц, предположительно, пыли) и отдельных редких коричневых пятен (цвета побегалости) размером в несколько квадратных сантиметров между слоями пленки, а также старение пленки, контактирующей с конденсаторным маслом. На возможную причину отказов вследствие **увлажнения** указывает наличие ржавчины в месте расположения верхней резиновой прокладки (рис. 6). Однако, при таком механизме ухудшения диэлектрических свойств изоляции наибольший процент числа дефектных секций должен наблюдаться в нижних пакетах секций, поскольку

плотность воды больше плотности масла, что не соответствует реальной картине при разборке КС. Причина отказов вследствие некачественной заводской **технологии изготовления**, на которую указывают места пробоев не на краю обкладок [5], а в различных местах по площади обкладок (см. рис. 1) вполне возможна, но должна проверяться в условиях заводского изготовления. А наличие значительно большего числа дефектных секций в верхних пакетах КС может быть связана с меньшим коэффициентом запрессовки верхних секций. **Старение** пропитанного конденсаторным маслом полипропиленового пленочного КС в условиях эксплуатации происходит под длительным влиянием электрического и теплового поля, а также механического нагружения. Кроме частичных разрядов наиболее серьезным недостатком, влияющем на снижение надежности КС является ухудшение электрофизических характеристик полипропиленовой пленки и ароматического жидкого диэлектрика вследствие постепенного растворения полимерного диэлектрика в жидком диэлектрике, что определено их химическим составом и строением. Указанное взаимодействие компонентов, которое детально исследовано в диссертации [6], имеет термоактивационную природу и проявляется в набухании полипропиленовой пленки с последующим растворением аморфной составляющей полимера в пропитывающей жидкости. Как следствие имеют место необратимые структурные изменения пленки, которые приводят к снижению ее электрической и механической прочности, а также увеличению диэлектрических потерь жидкого диэлектрика. Введение в последние 20 лет в конструкцию силовых высоковольтных конденсаторов изоляции из полипропиленовой пленки вместо апробированных длительной эксплуатацией пропитанных бумажных конденсаторов требует более тщательного исследования старения пленочной изоляции в пропитывающем конденсаторном масле и контроля технологии.



Рисунок 6 – Налет ржавчины в месте расположения верхней резиновой прокладки

Выводы. 1. У 40% СК 2008 г. выпуска (12 штук СК) типа СМ-166/3-14 УХЛ обнаружены неудовлетворительные изоляционные характеристики при

сроке эксплуатации – 5лет, что не соответствует паспортным показателям надежности. 2. Наиболее реальной причиной ухудшения изоляционных характеристик изоляции является применение в конструкции некачественных гетинаксовых стяжных планок, что возможно приводит к появлению перекрытий по торцевой поверхности секций, контактирующей с гетинаксовой планкой (рис. 2), что также замечено в этот же период в единой энергетической системе России [2]. 3. Основным диагностическим параметром, который определяет дефект изоляции для данной партии КС, является увеличение емкости, которое вызвано пробоем части последовательно включенных секций и уменьшением числа последовательно включенных здоровых секций. 4. Следует обратить внимание на обоснование причины пробоя большого количества секций в верхних группах и более глубокое исследование ресурса полипропиленовой изоляции, пропитанной конденсаторным маслом. 5. Видимо также необходимо обратить внимание производителей на необходимость улучшения качества и усиления контроля при технологическом процессе изготовления СК.

Список литературы: 1. Конденсаторы связи и отбора мощности для линий электропередач: ГОСТ 15581-80 – [Дата введения 1981-01-07]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1989. – 41 с. 2. Дементьев Ю. А. Итоги и задачи внедрения новых технологий. Анализ работы проблемного оборудования на ПС 220-1150 кВ в условиях ОЗП 2008/2009 годов [Электронный ресурс] / Ю. А. Дементьев // Доклад начальника Департамента систем передачи и преобразования электроэнергии. – Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы России, 2009. – 29 с. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/682798/#>. 3. Рудаков В.В. Влияние технологического допуска по емкости на схему соединения секций высоковольтных импульсных конденсаторов / Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Рудаков С.В. // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2004. – № 35 (1033). – С. 136-143. 4. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / И.М.Богатенков, Ю.Н.Боcharов, Н.И.Гумерова, Г.М.Иманов и др. Под ред. Г.С.Кучинского. –СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. 5. Бржезницкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посібник / Бржезницкий В. О., Исакова А. В., Рудаков В. В. та ін. За ред. В.О.Бржезницкого та В.М.Михайлова. – Х.: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. – 930 с. 6. Журавлев С. П. Влияние термоактивационного взаимодействия на электрофизические характеристики компонентов изоляции полипропиленовых конденсаторов промышленной частоты : дис. канд. техн. наук: 05.09.02 / Журавлев Сергей Петрович. – СПб, 2003. – 204 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kondensatory svyathi I otbora moshnosti dlja linij elektropredach GOST 15581-80-[Data vvedeniya 1981-01-07]. – M. IPK Izdatelstvo standartov, 1989. – 41. 2. Dement'ev Y.A. Itogi I zadachi vnedreniya novyh tehnologij. Analiz raboty problemnogo oborudovaniya na PS 220-1150 kV v usloviyah OZP 20082009 godov [Elektronnyj resurs] Y.A. Dement'ev Doklad nachalnika Departamenta system peredachi I preobrazovaniya elektroenergii. – Federalnaja setevaja kompanija Edinoj energeticheskoy sistemy Rossii, 2009. – 29. – Reggym dostupa: www.myshared.ru/slide/682798. 3. Rudakov V.V. Vlianie tehnologicheskogo dopuska po emkosti na shemu soedineniya sekzij visokovoltnih impulsnih kondensatorov Rudakov V.V.,Dubijchuk O.Y., Rudakov S.V.Vestnik NTU «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematychnyj vypusk. Elektrotehnika I peretvoryuyucha tehnika. – H.: NTU «HPI», 2004. – № 35 (1033). – 136-143. 4. Tehnika vysokih naprjaggenij : uchebnik dlja vuzov I.M. Bogatenkov, Y.N. Bocharov, N.I.Gumerova, G.M. Imanov I

dr. Pod red. G.S.Kuchinskogo. – SPb.: Energoatomizdat, Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. – 608. **5.** Tehnika I elektrofizyka vysokih naprug : navch. posibnyk Brggezitskij V.O., Isakova A.V., Rudakov V.V. ta in. Tha red. V.O. Brggezitskogo ta V.M.Myhajlova. – H.: NTU «HPI» – Tornado, 2005. – 930. **6.** Gguravlev S. P. Vlijanie termoaktivatsionogo vzaimodejstvija na elektrofizicheskie harakteristiki komponentov izoljatsii polipropilenovyh kondensatorov promyshlenoj chastoty:dis. kand. teh. nauk:05.09.02 Gguravlev Sergej Petrovich.

Надійшла (received) 18.03.2014

УДК 621.319.4

Параметричні відмови конденсаторів СМА-166/3-14 в південно-західній електроенергосистемі / Лабзун М.П., Лежнюк П.Д., Рубаненко А.Е., Рудаков В.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 88-96. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведені результати дослідження та причини погіршення ізоляційних якостей та показників надійності високовольтних конденсаторів зв'язку СМА-166/ $\sqrt{3}$ – 14УХЛ1.

Ключові слова: високовольтний конденсатор зв'язку, показники надійності, поліпропиленова ізоляція, трансформаторне масло.

УДК 621.319.4

Параметрические отказы конденсаторов СМА-166/3-14 в юго-западной электроэнергосистеме / Лабзун М.П., Лежнюк П.Д., Рубаненко А.Е., Рудаков В.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 88-96. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты исследования и причин ухудшения изоляционных свойств и показателей надежности высоковольтных конденсаторов связи СМА-166/ $\sqrt{3}$ – 14УХЛ1.

Ключевые слова: высоковольтный конденсатор связи, показатели надежности, полипропиленовая изоляция, трансформаторное масло.

Self-reactance refuses of capacitors of СМА - 166/ 3-14 in the south-west electropower system of Ukraine / Labzun M.P., Leggnuk P.D., Rubanenko A.E., Rudakov V.V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 88-96. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0740.

The results of research and reasons of worsening of isolating properties and indexes of reliability of high-voltage capacitors of connection СМА-166/ $\sqrt{3}$ – 14УХЛ1 are brought.

Key words: high-voltage capacitor of connection, reliability indexes, polipropilen isolation, transformer oil.