

КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО МКР-ТЕХНОЛОГИИ: РЕЖИМЫ РАБОТЫ И КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ

Висока щільність сучасного побутового індуктивного навантаження призводить до значних втрат енергії та необхідності її компенсації за рахунок індивідуальних однофазних металоплівкових сухих конденсаторів. Перенапруги, що виникають під час включення конденсаторів під напругу в залежності від параметрів навантаження та мережі, призводять до часткових розрядів в повітряних включеннях між проіарками металізованої плівки. Комплексний контроль електричних параметрів дозволяє обґрунтовано корегувати технологію виготовлення самовідновлювальних металоплівкових конденсаторів.

Высокая плотность современной бытовой индуктивной нагрузки приводит к значительным потерям энергии и необходимости их возмещения за счет индивидуальных однофазных металлопленочных сухих конденсаторов. Перенапряжения, возникающие в момент включения конденсаторов под нагрузку в зависимости от параметров нагрузки и сети, приводят к частичным разрядам в газовых включениях между слоями металлизированной пленки. Комплексный контроль электрических параметров позволяет обоснованно корректировать технологию изготовления самовосстанавливающихся металлопленочных конденсаторов.

ВВЕДЕНИЕ

Компенсация реактивной мощности (КРМ) в распределительных сетях коммунально-бытовых потребителей, содержащих преимущественно однофазную, коммутируемую по индивидуальному режиму нагрузку, – приоритетное направление системы электропитания. Однако в Украине устройства КРМ пока применяются еще недостаточно.

Ранее было принято считать, что из-за относительно коротких фидеров городских низковольтных распределительных сетей, небольшой (единицы кВА) присоединенной мощности и рассредоточения нагрузок, проблемы КРМ для них не существует.

Однако за последнее десятилетие расход электроэнергии на 1м² жилищного сектора увеличился втрое, средняя статистическая мощность силовых трансформаторов городских сетей достигла 325 кВА, а зона использования трансформаторной мощности сместилась в сторону увеличения и находится в пределах от 250 до 400 кВА.

Высокая плотность современной бытовой индуктивной нагрузки приводит к значительным потерям электроэнергии в распределительных сетях крупных городов и необходимости их возмещения за счет дополнительных источников генерации.

По оценкам, приведенным в различных источниках [1], среднестатистические потери электроэнергии в сетях потребителя лежат в пределах 10-16%. Одной из основных причин таких потерь по-прежнему остается недостаток компенсирующих устройств.

Наиболее распространенным типом компенсирующих устройств являются регулируемые конденсаторные установки (КУ).

К их достоинствам можно отнести: низкие потери активной мощности, простота подключения и обслуживания, возможность подключения практически в любом узле системы энергопотребления. Автоматическое регулирование мощности КУ может осуществляться в зависимости от суточного графика нагрузки, по значению параметра коэффициента мощности, по уровню и знаку реактивной мощности (генерация или потребление), по току нагрузки или по нескольким

параметрам одновременно (например, по времени суток, по реактивной мощности (РМ) и напряжению).

Однако сложность решения данного вопроса в распределительной сети бытового сектора во многом связана с неравномерным потреблением РМ по отдельным фазам, затрудняющая применение традиционных для промышленных сетей КУ на базе трехфазных батарей конденсаторов, управляемых регулятором, установленным в одной из фаз компенсируемой сети.

В мировой практике конденсаторостроения отмечается интенсивная разработка и внедрение однофазных металлизированных конденсаторов для компенсации реактивной мощности в распределительных сетях на минимальном удалении от потребителей. При этом доля низковольтных (до 1 кВ) косинусных сухих (без жидкой пропитки) конденсаторов, изготовленных по различным модификациям металлопленочной технологии, составляет 75-80 % от общего объема.

Потери активной мощности в таких конденсаторах не превышают 5-ти Вт на 1 кВАр установленной мощности. Установка конденсаторов в бытовом секторе приводит к росту средневзвешенного коэффициента мощности распределительной сети с 0,84 до 0,93, что позволяет ежегодно экономить примерно 280 кВт·ч на каждый установленный кВАр реактивной мощности [1]. Кроме того, учитывая качественные изменения характера бытовой нагрузки (импульсные источники питания электроприборов, активные балласты энергосберегающих ламп), искажающих синусоидальность напряжения сети, одновременно при помощи таких конденсаторов удается снизить уровень гармонических составляющих – в среднем на 1 %.

Вместе с тем, наблюдаются более частые случаи выхода металлопленочных конденсаторов из строя при меньшем сроке их службы. Минимальный срок службы силовых конденсаторов КРМ напряжением выше 1 кВ составляет не менее 10 лет.

Можно выделить четыре группы причин: первая связана непосредственно с технологией изготовления конденсаторов, три последующие – с режимами эксплуатации:

1. Несовершенство контроля технологического процесса изготовления металлопленочных конденсаторов.

2. Повышение температуры в зданиях за счет более жаркого лета в последние годы.

3. Значительное увеличение нагрузки за счет влияния высших гармоник, повышения колебаний напряжения сети и увеличения частоты включения.

4. Увеличение количества применяемых конденсаторов с предельно рассчитанными параметрами.

Цель статьи – анализ режимов работы металлопленочных конденсаторов и методы контроля технологии их изготовления.

МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПО МКР – ТЕХНОЛОГИИ

Прогресс в достижении высоких удельных характеристик металлопленочных конденсаторов является следствием появления и применения более совершенных материалов и технологий [2, 3]. Одно из эксплуатационных преимуществ металлопленочных конденсаторов – самовосстановление диэлектрической системы после локального пробоя. На рис. 1 показана конструкция металлопленочного конденсатора по МКР – технологии (Metallized Kunststoff Polypropylene): 1 – цилиндрическая сухая секция без применения пропитывающих составов, 2 – слой контакта (шоопировка), 3 – односторонне металлизированная полипропиленовая пленка, 4 – не металлизированная зона (собственно полипропиленовая пленка).

В момент короткого замыкания (электрического пробоя) в месте пробоя в течение нескольких микросекунд испаряется металлический слой и удаляется из центра пробоя. В результате образуется свободная от металла изолированная зона (рис. 2 [3]). Конденсатор остается во время пробоя и после него полностью работоспособным: потеря номинальной емкости не более 0,0001 % [3]. В конце срока работы в конденсаторе из-за большого количества самовосстанавливающихся пробоев может возникнуть избыточное давление. Для предотвращения взрыва корпуса в конденсаторах предусмотрен предохранитель-прерыватель избыточного давления.

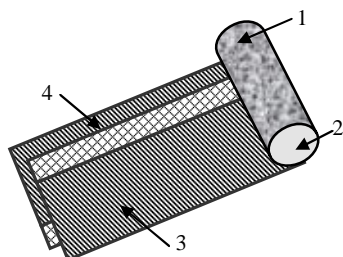


Рис. 1

Применение в качестве диэлектрика изотактической полипропиленовой пленки с высокой степенью выдержки толщины в пределах 5-10 мкм (рис. 3 – поверхность полипропиленовой пленки под электронным микроскопом [3]) позволяет повысить энергетическую эффективность пленочных конденсаторов за счет увеличения рабочей напряженности электрического поля.

Металлизация пленки осуществляется методом вакуумного напыления. Глубокий вакуум (до 10^{-6} мм.рт.ст.) и модульная конструкция алюминий-цинкового испарителя позволяет получать структуру напыления металлизированного слоя высокого качества. Толщина слоя металлизации порядка 10 нм (проводимость пленки) поддерживается и контролируется в течение всего процесса. Намотка секций производится на высокопроизводительном оборудовании, которое обеспечивает нужный класс точности и стабильность емкости.

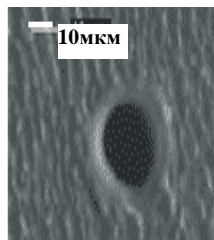


Рис. 2

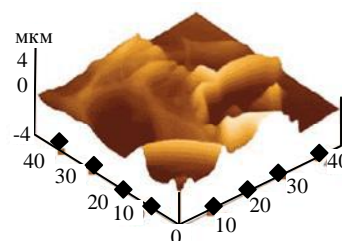


Рис. 3

Обе торцевые стороны секции (рис. 1, поз. 2) металлизуются методом напыления и гарантируют высокую токовую нагрузку и низкоиндуктивный контакт между выводами и секцией. Секции сушатся (запекаются) под вакуумом. Пространство между секцией и корпусом заполняется самогасящимся полиуретановым либо эпоксидным компаундом.

За счет непосредственной металлизации пленки при одинаковых ее размерах и практически одинаковой напряженности поля они имеют меньшие габаритные размеры, чем используемые ранее конденсаторы по МРР – технологии – пропитанные конденсаторы с двухсторонне металлизированной бумажной лентой и полипропиленовой пленкой (табл. 1). При идентичных с МРР размерах в конденсаторах МКР достигаются большие значения нагрузочного напряжения (при соответствующей толщине диэлектрика). Из-за отсутствия бумажного диэлектрика нет необходимости в дорогостоящем процессе пропитки.

Таблица 1

Параметр	Металлопленочные конденсаторы по технологии:	
	МРР	МКР
Номинальная мощность, кВАр	5-12,5	1-50
Номинальное напряжение, В	400-810	230-800
Частота, Гц	50/60	50/60
Максимально допустимый ток	$2 \cdot I_{ном}$	$1,6 \cdot I_{ном}$
Срок службы, час	>200000	>130000

РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ

Включение индивидуальных однофазных конденсаторов МКР осуществляется последовательно (рис. 4) либо параллельно нагрузке. По аналогии с силовыми конденсаторами КРМ можно сказать, что в первом случае это серийные конденсаторы, т.е. осуществляется продольная компенсация реактивной мощности, во втором случае – шунтовые – поперечная компенсация.

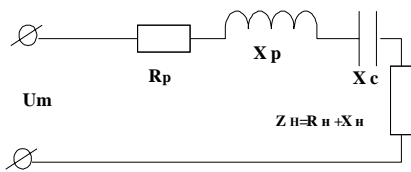


Рис. 4

Емкость конденсатора C_k выбирается из условия равенства реактивной мощности конденсатора Q_k реактивной мощности нагрузки Q_n :

$$Q_k = U_n^2 \cdot \omega \cdot C_k; \quad Q_n = S \cdot \sin \varphi = \frac{P \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi};$$

$$C_k = \frac{1}{U_n^2 \cdot \omega} \cdot \frac{P \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi};$$

где U_n – номинальное напряжение конденсатора; ω – круговая частота; S – установленная полная мощность нагрузки, кВАр; $\cos \varphi = P/S$ – коэффициентом мощности потребителя, который определяется как отношение потребляемой активной мощности к полной, действительно взятой из сети. [Чем ближе значение $\cos \varphi$ к единице, тем меньше доля взятой из сети реактивной мощности. Например, $\cos \varphi$ асинхронных двигателей составляет примерно 0,7; $\cos \varphi$ электродуговых печей и сварочных трансформаторов – около 0,4; $\cos \varphi$ станков и машин – не более 0,5 и т.д. Полное использование мощностей сети возможно только при компенсации реактивной составляющей мощности].

Вне зависимости от способа подключения характер переходного процесса определяется соотношением между собственными и вынужденными колебаниями напряжения.

При последовательном подключении конденсатора к индуктивной нагрузке переходный процесс носит колебательный характер $R < 2 \cdot \sqrt{L/C_k}$. Мгновенные значения напряжения и тока на конденсаторе определяется как [4]:

$$u(t) = U_m / (Z \cdot \omega \cdot C_k) \cdot \sin(\omega \cdot t + \Psi - \varphi - \pi/2) +$$

$$+ U_m / (Z \cdot \omega \cdot C_k) \cdot \cos(\Psi - \varphi) / \sin \beta \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \beta) -$$

$$- U_m / (Z \cdot \omega \cdot C_k) \sin(\Psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \cdot \sin \omega_1 \cdot t;$$

$$i(t) = U_m / (Z) \cdot \sin(\omega \cdot t + \Psi - \varphi) +$$

$$U_m / (Z_k) \cdot \sin(\Psi - \varphi) / \sin \beta \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t - \beta) -$$

$$U_m / (Z \cdot \omega \cdot \omega_1 L C_k) \cos(\Psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \cdot \sin \omega_1 \cdot t;$$

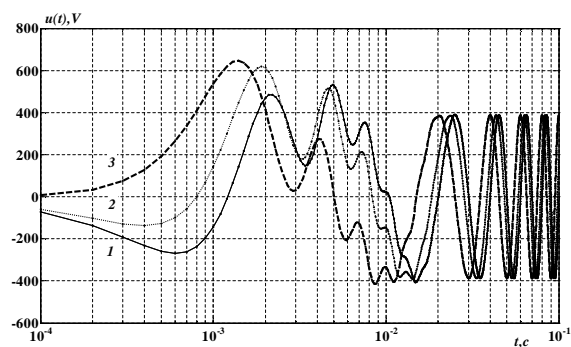
где U_m – амплитудное (номинальное) значение напряжения конденсатора; $Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C_k}\right)^2} + \omega^2 \cdot L^2$ –

полное сопротивление цепи с активным сопротивлением $R = R_p + R_n$ и индуктивностью $L = L_p + L_n$ (см. рис. 4), Ψ – начальная фаза напряжения сети; $\varphi = \arctg((\omega L - 1/(\omega C_k))/R)$ – угол сдвига фаз между напряжением и током; $\omega_1 = \sqrt{1/(LC_k) - (R^2/(4L^2))}$ – собственная круговая частота контура, образованного подсоединительными проводами, конденсатором и нагрузкой; $\beta = \arctg(\omega_1/\alpha)$ – коэффициент фазы; $\alpha = R/(2L)$ – коэффициент затухания.

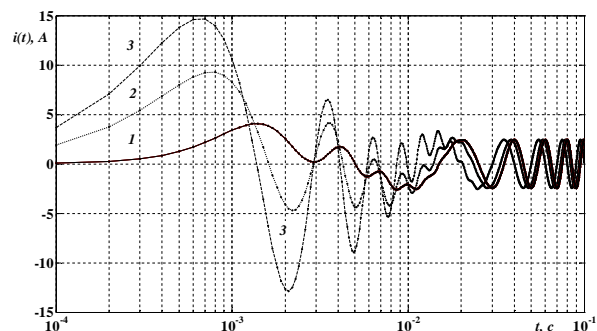
На рис. 5-7 приведены результаты расчета пере-

ходного процесса при подключении серийного конденсатора МКР номинальной емкостью $C_k = 20$ мкФ и рабочим напряжением 380 В к сети частоты 50 Гц. Как видно из рис. 5, начальная фаза Ψ напряжения сети существенно влияет на возникновение перенапряжений (рис. 5,а) и сверхтоков (рис. 5,б) в цепи с конденсатором: 1 – $\Psi = 0$, 2 – $\Psi = 30^\circ$ и 3 – $\Psi = 90^\circ$. Параметры цепи: $R = 4$ Ом, $L = 10$ мГн. При $\Psi = 90^\circ$ напряжение на конденсаторе более чем на 60 % превышает номинальное и наблюдается пятикратное превышение тока. Длительность переходного процесса составляет около 20 мс.

При уменьшении активного сопротивления цепи R в 4 раза (рис. 6: 1 – $R = 4$ Ом, 2 – $R = 1$ Ом) напряжение на конденсаторе возрастает на 20 % (рис. 6,а), а ток – только на 7 % (рис. 6,б) (для самого неблагоприятного случая начальной фазы напряжения $\Psi = 90^\circ$ и неизменной индуктивности цепи $L = 10$ мГн).



а

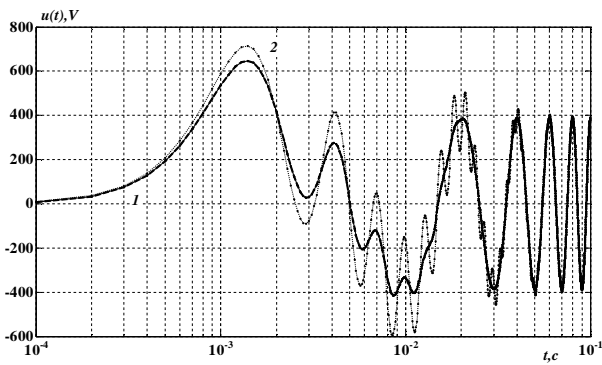


б

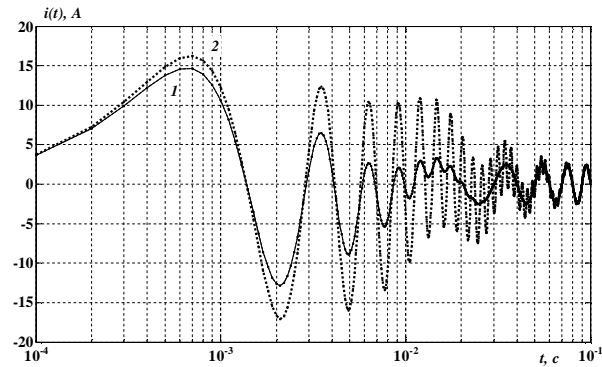
Рис. 5

Наибольшее влияние на напряжение оказывает величина индуктивности нагрузки (рис. 7,а: 1 – $L = 10$ мГн, 2 – $L = 100$ мГн при $R = 4$ Ом и $\Psi = 90^\circ$): в цепи возникают двукратные превышения напряжения, при этом ток – уменьшается (сравни кривые 1 и 2 рис. 7,б). Длительность переходного режима – возрастает.

Применение пускорегулирующей аппаратуры позволяет плавно изменять напряжение источника, что уменьшает перенапряжения и сверхтоки на конденсаторе в момент его подключения.

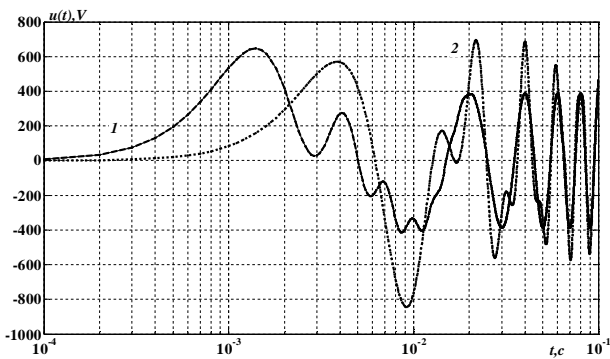


а

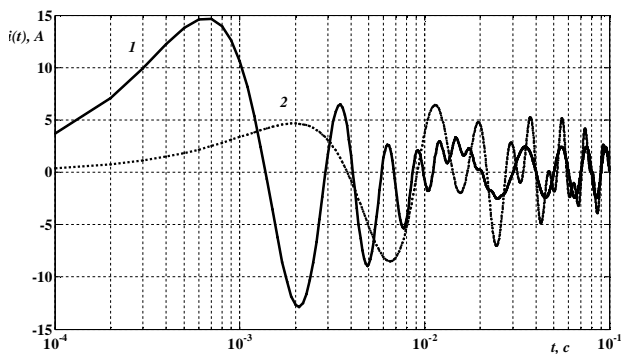


б

Рис. 6



а



б

Рис. 7

КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Возникающие перенапряжения обуславливают развитие ионизационных процессов в сухом непропитанном конденсаторе МКР при условии наличия в нем воздушных включений. Минимальное возможное напряжение начала частичных разрядов составляет 330В, при этом размер активизируемых воздушных включений равен 12 мкм. Так как толщина металлизированной пленки меньше, то включения активизируются не в самой пленке, а между слоями [5]. Зазоры могут образовываться из-за неровностей и деформации оправки, на которую наматывается секция. Запечка секций не приводит в этом случае к полной ликвидации зазоров.

На стадии разработки новых конструкций металлопленочных конденсаторов, отработки их технологии изготовления необходимо проводить дополнительный контроль электрических параметров, позволяющий выявить опасные воздушные включения, активизируемые при рабочем напряжении.

При производстве конденсаторов проводятся типовые и контрольные испытания. Так, контрольные испытания металлопленочных конденсаторов в указанном порядке предусматривают, в частности, испытание на герметичность; испытание напряжением между выводами (табл. 2); испытание напряжением между выводами и корпусом; внешний осмотр; измерение емкости; измерение тангенса угла диэлектрических потерь [6].

Таблица 2

Режим	Отношение испытательного напряжения к номинальному переменному напряжению	Длительность типового испытания, с
Непрерывный	2	60

Для металлизированных конденсаторов свойство самовосстановления (величина и длительность приложенного напряжения) проверяется в соответствии с табл. 2. Самовосстанавливающиеся пробои во время испытания обнаруживают с помощью осциллографа или с помощью акустического или высокочастотного метода.

Проверяются также допустимые перегрузки: максимально допустимое напряжение, максимально допустимый ток и максимально допустимая реактивная мощность [6]:

1. Металлизированные конденсаторы должны быть пригодны к эксплуатации в ненормальных условиях в течение продолжительных периодов при действующем напряжении между выводами, которое не превышает в 1,1 раз номинальное напряжение, **исключая переходные процессы**, вызываемые включением конденсаторов в схему и выключением из нее, но учитывая влияние гармоник и изменение напряжения питания.

2. Конденсаторы должны быть пригодны для эксплуатации при действующем значении тока, не превышающем 1,3 тока, проходящего при номинальном синусоидальном напряжении и номинальной частоте, **исключая переходные процессы**.

3. Перегрузка, происходящая из-за эксплуатации при значениях напряжения и тока, превышающих

номинальные значения, не должна превышать номинальную мощность более чем в 1,35 раза.

На рис. 8-9 приведены результаты измерений электрических параметров двух партий сухих металлопленочных конденсаторов УК78-15 (16 мкФ, 500В), изготовленных по базовой (образцы № 1-4) и усовершенствованной (образцы № 5-8) технологии.

Как видно из результатов измерений, конденсаторы № 1-4 имеют большее количество воздушных включений, чем № 5-8. Это проявляется в более высокой частоте ЧР (рис. 8), а также в более высоком уровне восстанавливающегося напряжения (рис. 9).

Усовершенствование технологии не привело к исключению зазоров между слоями металлизированной полипропиленовой пленки: при рабочем напряжении $U = 500$ В активизируются воздушные зазоры толщиной от 3 до 50 мкм.

При рабочем напряжении в конденсаторах не должно быть частичных разрядов.

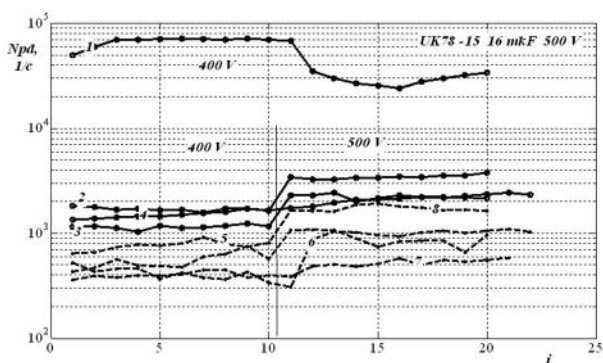


Рис. 8

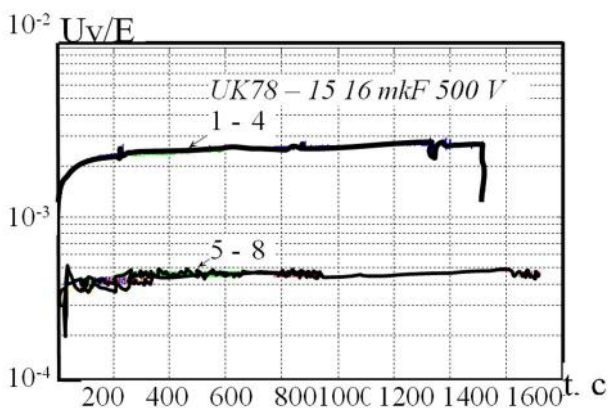


Рис. 9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая однородность металлизированной полипропиленовой пленки, обладающей свойством самовосстановления, позволяет выпускать конденсаторы МКР с запасом по напряжению, что снижает вероятность ионизационных процессов в переходном режиме.

Настройки технологического оборудования при производстве металлопленочных секций должны обеспечивать высокую плотность намотки для исключения образования воздушных зазоров, активируемых при рабочих напряжениях.

Комплексный контроль электрических параметров конденсаторов МКР, включающий, помимо измерения емкости и тангенса угла диэлектрических по-

терь, измерение частичных разрядов и восстанавливающегося напряжения, позволяет обоснованно корректировать технологию изготовления металлопленочных конденсаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухта О., Симонова Е. К вопросу об эффективности компенсации реактивной мощности // Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 9. – С. 90-93.
2. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. – 79 p.
3. Self-healing process in metallized capacitors / Электронный ресурс / www.wiwa.com.
4. Безпрозванных А.В. Методические указания по организации самостоятельной работы по курсу "Основы конденсаторостроения". – Харьков: ХПИ, 1989. – 37 с.
5. Лактионов С.В. Идентификация дефектов твердой изоляции по зависимости от напряжения частоты частичных разрядов // Вестник НТУ "ХПИ". – 2004. – №7. – С. 115-120.
6. ГОСТ Р МЭК 60252-1-2005 Конденсаторы для двигателей переменного тока. Часть 1. Общие положения. Рабочие характеристики, испытания и номинальные параметры. Требования безопасности. Руководство по установке и эксплуатации. Дата введения – 2007.01.01.

Bibliography (transliterated): 1. Kuhta O., Simonova E. K voprosu ob `effektivnosti kompensacii reaktivnoj moschnosti // `Energeticheskaya politika Ukrainy. - 2004. - № 9. - S. 90-93. 2. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. - 79 p. 3. Self-healing process in metallized capacitors / `Elektronnyj resurs / www.wiwa.com. 4. Bezprozvannyh A.V. Metodicheskie ukazaniya po organizacii samostoyatel'noj raboty po kursu "Osnovy kondensatorostroeniya". - Har'kov: HPI, 1989. - 37 s. 5. Laktionov S.V. Identifikaciya defektov tverdoj izolyacii po zavisimosti ot napryazheniya chastoty chastichnyh razryadov // Vestnik NTU "HPI". - 2004. - №7. - S. 115-120. 6. GOST R M`EK 60252-1-2005 Kondensatory dlya dvigatelej peremennogo toka. Chast' 1. Obschie polozheniya. Rabochie harakteristiki, ispytaniya i nominal'nye parametry. Trebovaniya bezopasnosti. Rukovodstvo po ustanovke i `ekspluatcii. Data vvedeniya - 2007.01.01.

Поступила 05.08.2011

Безпрозванных Анна Викторовна, д.т.н., проф.,
Лактионов С.В.

Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076010
e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

Bezprozvannyh A.V., Laktionov S.V.

Capacitors for reactive power compensation via MKR-technology: operating modes and control of technology.

High density of modern household inductive loading results in significant energy loss and brings about necessity of its compensation due to individual single-phase metallized dry capacitors. Overvoltage arising at the moment of the capacitors actuation under loading depending on parameters of the loading and the network causes partial discharges in gas inclusions between the metallized film layers. Complex control of electric parameters allows valid correction of self-restoring metallized capacitors manufacturing technique.

Key words – inductive loading, reactive power compensation, metallized capacitors, self-restoring process, transient, overvoltage, manufacturing techniques, complex control of electric parameters.