

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук; ***О.Ю.ДУБИЙЧУК***; ***Ю.В.КРАВЧЕНКО***;
Е.П.ЕРЕМЕЕВА; ***В.П.КРАВЧЕНКО***; ***Е.Г.КРАМЧАНИН***;
В.О.ЛЫСЕНКО; НТУ «ХПИ»

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ СЕКЦИЙ

Показано, що при розробці високовольтних імпульсних конденсаторів з послідовним з'єднанням плоскокоматних секцій необхідно враховувати різний ступінь пресування секцій по товщині пакету секцій та товщину обкладок секцій. Наведено конструкції конденсаторів зі збільшеною товщиною діелектрика між обкладками.

It has been shown that different degree of pressing the capacitor gangs across the gangs' package thickness as well as the capacitor plate thickness should be taken into account at developing the high voltage pulse capacitors and capacitors with increased thickness of a dielectric between the plates.

При конструюванні високовольтних імпульсних конденсаторів с бумажно-касторовим (или комбинированным) диэлектриком возникает задача оптимального выбора толщины диэлектрика между обкладками и соответственно числа последовательно включенных групп секций [1-2]. В работе [1] показано, что с учетом технологического допуска отклонения по емкости с уменьшением числа последовательных секций (или, что тоже, увеличением толщины диэлектрика между обкладками) коэффициент перенапряжения на последовательно включенных секциях с отрицательным допуском по емкости уменьшается, что способствует увеличению ресурса. С другой стороны, ресурс при увеличении толщины диэлектрика уменьшается. Следовательно, возможен оптимум по выбору толщины диэлектрика и числа последовательно включенных групп секций. В работе [2] определены значения показателей степени в формуле степенной зависимости ресурса от толщины диэлектрика по результатам ресурсных испытаний секций с бумажно-касторовой изоляцией в импульсном режиме.

В результате анализа факторов, влияющих на выбор конструкции, были выявлены основные: коэффициент перенапряжения η , обусловленный технологическим отклонением значений последовательно соединенных групп секций от номинального значения; толщины диэлектрика между обкладками; толщины одного листа (слоя) диэлектрика; отношение толщины обкладки к толщине диэлектрика; показатели надежности: средний ресурс и среднеквадратическое отклонение. Учет этих факторов позволил построить формулы для сравнения ресурсов сравниваемых конструкций.

Для толщины диэлектрика $d_{из} < 80$ мкм:

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^{6,5} \left(\frac{d_{2uz}}{d_{1uz}} \right)^{2,14} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \left(\frac{1+\gamma_2}{1+\gamma_1} \right)^{3,25}, \quad (1)$$

где M_1, M_2 – значения средних ресурсов секций конденсаторов с одинаковой площадью обкладок, но разными значениями толщины диэлектрика между обкладками; $d_{1uz}, d_{2uz}, \gamma_1, \gamma_2$ – толщина диэлектрика между обкладками, отношение толщины обкладки к толщине диэлектрика соответственно в конструкциях 1 и 2 исполнения секций; N – число слоев диэлектрика между обкладками.

Соответственно для $80 \text{ мкм} < d_{uz} < 240 \text{ мкм}$ (увеличение d_{uz} более 240 мкм приводит к резкому сокращению ресурса):

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^{6,5} \left(\frac{d_{2uz}}{d_{1uz}} \right)^{1,74} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \left(\frac{1+\gamma_2}{1+\gamma_1} \right)^{3,25}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) отличаются показателем степени при d_{uz} .

Что касается такого показателя как среднеквадратическое отклонение, то его значение при $d \leq 60 \text{ мкм}$ принято в [2] предположение справедливости применения логнормального закона распределения отказов

$$\sigma_{lgM} = 0,1 \left(\frac{60}{d} \right)^{1,5}, \quad (3)$$

а при $d \geq 80 \text{ мкм}$ в соответствии с рис. 1.

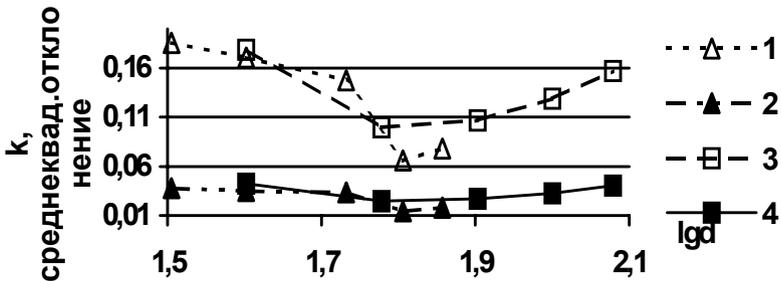


Рисунок 1 – Зависимости среднеквадратического отклонения σ_{lgM} для герметичных (1) и негерметичных (3) секций и коэффициента вариации k от толщины диэлектрика.

При этом значении σ_{lgM} зависит как от толщины диэлектрика, так и от рабочей напряженности электрического поля.

При сравнении конструкций с различной толщиной диэлектрика возможны следующие варианты подходов:

- жесткий вариант, когда из n последовательных секций одна имеет отрицательный допуск по емкости, а остальные положительный. При этом коэффициент перенапряжения составляет:

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

где k_1 – положительный допуск по емкости в %; k_2 – отрицательный допуск по емкости (абсолютное значение в %).

Коэффициент η увеличивается при увеличении n .

При этом надежность конденсатора фактически определяется надежностью одной последовательно включенной группы секций;

- мягкий вариант, когда из n последовательных секций одна имеет положительный допуск по емкости, а остальные – отрицательный. В этом случае коэффициент перенапряжения равен:

$$\eta = \frac{n(1 + 0,01k_1)}{1 - 0,01k_2 + (n - 1)(1 + 0,01k_1)}. \quad (5)$$

При этом при увеличении числа последовательных групп секций значение η уменьшается. Однако надежность конденсатора P также уменьшается как $P \sim P_c^{n-1}$, где P_c – надежность одной последовательно включенной группы секций;

- средний вариант, характеризующийся наличием m секций с отрицательным допуском по емкости k_2 (%) и $(n-m)$ секций с положительным допуском по емкости k_1 (%). Коэффициент перенапряжения составит:

$$\eta = \frac{n(1 + 0,01k_1)}{(n - m)(1 - 0,01k_2) + m(1 + 0,01k_1)}. \quad (6)$$

Сравнительный анализ различных конструкций конденсаторов показал, что при выборе одной из двух конструкций: с одной группой секций или с двумя последовательными группами секций, с толщиной диэлектрика вдвое меньшей, предпочтение следует отдавать конструкциям конденсаторов с одной группой секций и повышенной толщиной диэлектрика.

При сравнительном анализе конструкций высоковольтных импульсных конденсаторов с двумя или более последовательно включенными группами секций такой подход предполагает применение толщин диэлектрика в диапазоне $80 \div 120$ мкм, но не более.

Однако для высоковольтных импульсных конденсаторов необходимо учитывать следующие особенности.

1. Основным требованием, предъявляемым к импульсным конденсаторам, является малое значение собственной индуктивности. В конструктивном плане это означает, что длина пути основного тока разряда в конденсаторе должна быть минимальна, и развязки токовых путей внутри конденсатора должны быть взаимно скомпенсированы (бифилярные пути протекания тока). При больших значениях номинального напряжения и емкости конденсатора это требование приводит к необходимости выполнения конденсатора, как

правило, прямоугольной формы с большим поперечным сечением перпендикулярно направлению протекания тока и малой толщиной в направлении протекания тока. Естественно, что внутри конденсатора обкладки следует располагать параллельно поперечному сечению конденсатора (рис. 2).

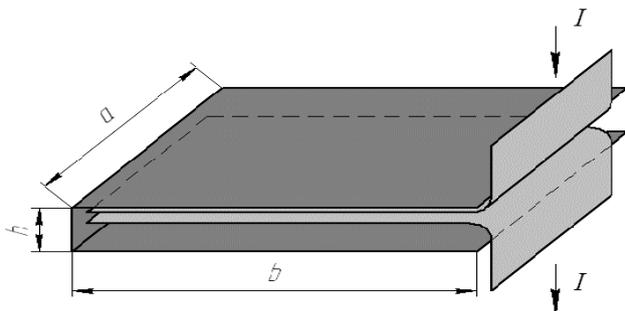


Рисунок 2 – Соотношение размеров конструкции малоиндуктивного конденсатора

При $a > 3h$ и $b > (3 \div 5)h$ обеспечить равномерную запрессовку секций конденсатора по всей площади $S = a \times b$ представляется проблематичным.

Это возможно путем применения специальных сжимающих устройств в направлении h , что ведет к существенному увеличению габаритов конденсаторов и увеличению индуктивности. При типовой технологии запрессовки секций в картонных или бумажных хомутах крайние секции будут менее сжаты, чем средние. И поэтому их емкость меньше чем у средних, как показывает опыт, до 20 %. Ясно, что у конденсатора с большим числом последовательно соединенных групп секций отклонение емкости крайних секций от номинального значения будет больше, чем у конденсатора с меньшим числом последовательно соединенных секций из-за разной толщины одной последовательной группы секций и, следовательно, разной степени запрессовки. Поэтому сравнение ресурсов конденсаторов с разным числом последовательно соединенных секций для этого случая следует проводить с учетом неодинакового значения отклонения по емкости.

2. Немаловажным обстоятельством является стоимость конденсатора, отнесенная к одному циклу заряд-разряд. Чем меньше это значение, тем выгоднее создание и использование такого конденсатора. При прочих равных условиях стоимости конденсаторов с разными количествами последовательно соединенных групп секций будут отличаться за счет разной стоимости бумаги и алюминиевой фольги. Стоимость бумаги в $2,5 \div 3$ раза меньше стоимости фольги и поэтому уменьшение массы фольги при больших толщинах изоляции может существенно уменьшить стоимость конденсатора.

Приведем пример сравнительного анализа по выбору конструкции кон-

денсатора КИМ-120 на номинальное напряжение 53 кВ, емкостью 1,35 мкФ, с площадью поперечного сечения пакета секции $S = 490 \times 600$ мм и толщиной пакета $h = 90$ мм (условие $a > 5h$ и $b > 5h$ выполняется).

№ конструкции	1	2	3	4	5	6
Толщина диэлектрика, мм	60	80	100	120	140	160
n (на практике округляется до целого)	13,1	9,82	7,86	6,55	5,61	4,91
$\Delta C = 0$, отношение ресурсов M_i/M_2	1,018	1,0	1,022	1,02	1,001	0,977
$\Delta C = 0$, отношение ресурсов M_i/M_2 при $p = 0,5$, $d_\phi = 30$ мкм	0,928	1,0	1,127	1,179	1,198	1,238
Отношение стоимости пакетов секций на 1 цикл заряд-разряд β_i/β_2^* при $p = 0,5$	1,31	1	0,768	0,656	0,593	0,533
$\Delta C = 0$, Отношение ресурсов M_i/M_2 , $d_\phi = 10$ мкм	1,23	1,0	0,916	0,844	0,784	0,731
$\Delta C = 0$, Отношение ресурсов M_i/M_2 при $p = 0,5$, $d_\phi = 10$ мкм	1,16	1,0	0,957	0,911	0,846	0,811
Отношение стоимости пакетов секций на 1 цикл заряд-разряд β_i/β_2^* при $p = 0,5$	0,977	1,0	0,986	0,978	0,962	0,951
$\Delta C = 10$ %, Отношение ресурсов M_i/M_2	1,197	1,0	0,946	0,906	0,87	0,839
$\Delta C = 10$ %, Отношение ресурсов M_i/M_2 при $p = 0,5$, $d_\phi = 10$ мкм	1,127	1,0	0,988	0,978	0,965	0,951
β_i/β_2^* при $p = 0,5$	1,006	1,0	0,931	0,886	0,858	0,841
Жесткий вариант с учетом особенности $k_1 = k_2$	10	9	8	7	6	5
Отношение ресурсов M_i/M_2 , $d_\phi = 10$ мкм	1,067	1,0	1,056	1,114	1,176	1,225
Отношение ресурсов M_i/M_2 при $p = 0,5$, $d_\phi = 10$ мкм	1,005	1,0	1,108	1,202	1,304	1,389
β_i/β_2^* при $p = 0,5$	1,128	1,0	0,834	0,721	0,635	0,576

* β_2 – стоимость пакета конструкции 2; β_i – стоимость пакета конструкции i (стоимость 1кг бумаги – 13грн; 1кг касторового масла – 10грн; 1кг фольги – 33грн)

В таблице приведены основные данные сравнительного анализа 6 вариантов исполнения конденсатора КИМ-120 с различной толщиной диэлектрика.

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, во-первых,

что в случае применения толстой фольги (30 мкм) ресурс для всех вариантов практически одинаков, если не учитывать надежность. Перерасчет к одинаковой надежности в этом случае, например, для среднего ресурса ($P = 0,5$), приводит к увеличению ресурса с увеличением толщины диэлектрика даже при нулевом технологическом допуске по емкости. Причем, стоимость пакета секций также уменьшается с увеличением толщины диэлектрика. При применении тонкой фольги 10 мкм ресурс конденсатора уменьшается с увеличением толщины диэлектрика, как при нулевом так и при 10 % технологическом допуске при одной и той же надежности. Однако, стоимость пакета как и в случае толстой фольги уменьшается. С учетом особенности 1 (когда отклонение по емкости зависит от числа последовательно соединенных групп секций) применение секций конденсаторов с увеличенной толщиной диэлектрика предпочтительнее, когда отклонение по емкости у крайних секций в 1,75 и более раз больше, чем у секций, расположенных в середине пакета секций, при числе последовательно соединенных секций более 2. В таблице приведен пример расчета, когда отклонение по емкости у крайних секций составляет 10 %, а в средней части 5 %.

Сравнительный анализ выбора схемы соединения секций конденсатора КИМ-120 ($E = 70$ кВ/мм) показал, что при применении толстой фольги (30 мкм), когда необходимо формировать большие импульсные токи, предпочтительнее применять варианты с большей толщиной диэлектрика даже при нулевом технологическом допуске. Физически это связано с тем, что уменьшается объем, занимаемый фольгой. Этот объем можно использовать для дополнительного размещения активного диэлектрика, то есть возможно снижение рабочей напряженности поля и увеличение ресурса. Следует заметить, что в случае применения меньших толщин диэлектрика с лучшими показателями по ресурсу, стоимость одного разряда конденсатора может оказаться большей, чем у конструкции с большей толщиной диэлектрика. В этом случае может оказаться выгоднее изготавливать конденсаторы с большей толщиной изоляции, но с меньшим значением ресурса.

В конденсаторе КИМ-120 применена алюминиевая фольга толщиной 30 мкм, поскольку конденсатор формирует импульсы тока большой амплитуды $160 \div 180$ кА.

Внешний вид конденсаторов с большой толщиной диэлектрика представлен на рис. 3-8.

К такому классу импульсных конденсаторов (с большой площадью запрессовки) относятся КИМ-125 на 100 кВ, емкостью 1 мкФ у которого $a = 490$ мм, $b = 600$ мм, $h = 90$ мм (рис. 5), КИМ-134 на 100 кВ емкостью 37 нФ, КИМ-131 на 100 кВ емкостью 5 нФ. КИМ-125 содержит восемь последовательно включенных групп секций с толщиной изоляции 0,144 мм и толщиной листа бумаги 12 мкм, толщина фольги 30 мкм.

Конденсатор КИМ-134 содержит 14 последовательно включенных групп секций с толщиной изоляции 120 мкм из бумаги КОН-2 8 мкм (рис. 7). Конденсатор КИМ-131 содержит 10 последовательно включенных групп секций с толщиной изоляции 120 мкм из бумаги КОН-2 10 мкм.

Конденсаторы КИМ-122 и КИМ-136 относятся к типу конденсаторов с нормальной площадью запрессовки. Соответственно содержат 90 и 66 последовательно включенных секций с толщиной диэлектрика 120 и 144 мкм.

Конденсаторы успешно выдержали приемо-сдаточные испытания, а конденсаторы КИМ-120 и КИМ-122 отработали заданный по ТЗ ресурс, без отказов и продолжают эксплуатироваться на установках предприятий-заказчиков.

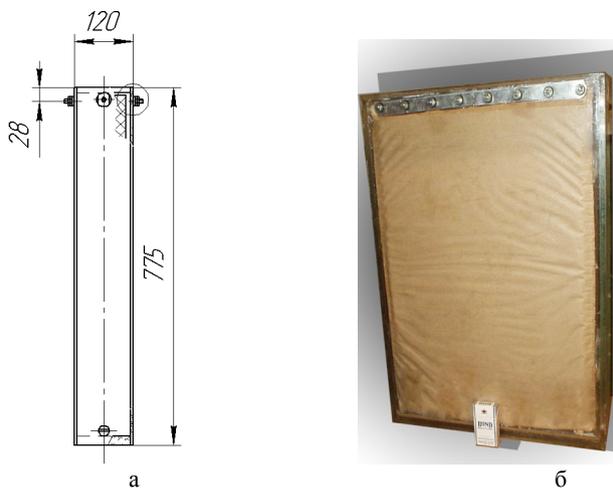


Рисунок 3 – Конденсатор КИМ-120: а – габаритные размеры, б – внешний вид

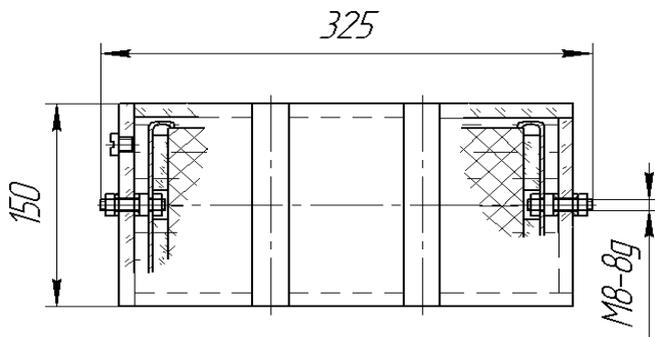


Рисунок 4 – Конденсатор КИМ-122, габаритные размеры

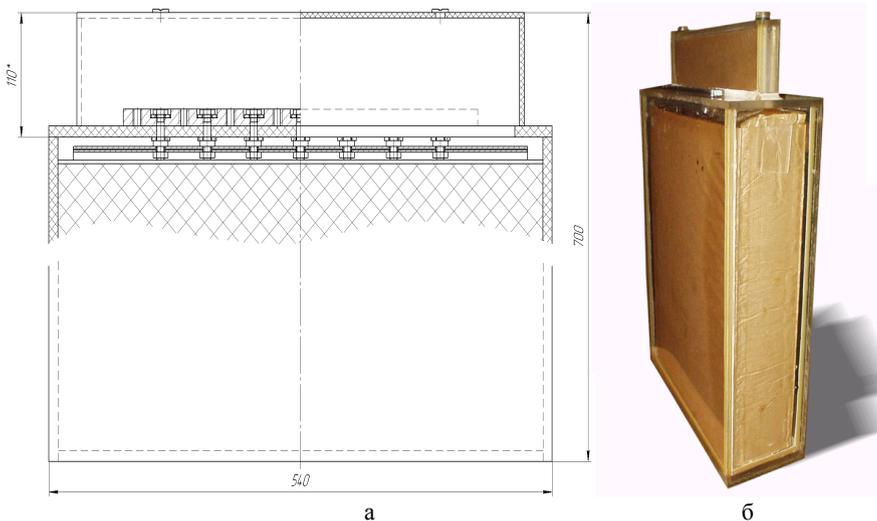


Рисунок 5 – Конденсатор КИМ-125: а – габаритные размеры, б – внешний вид

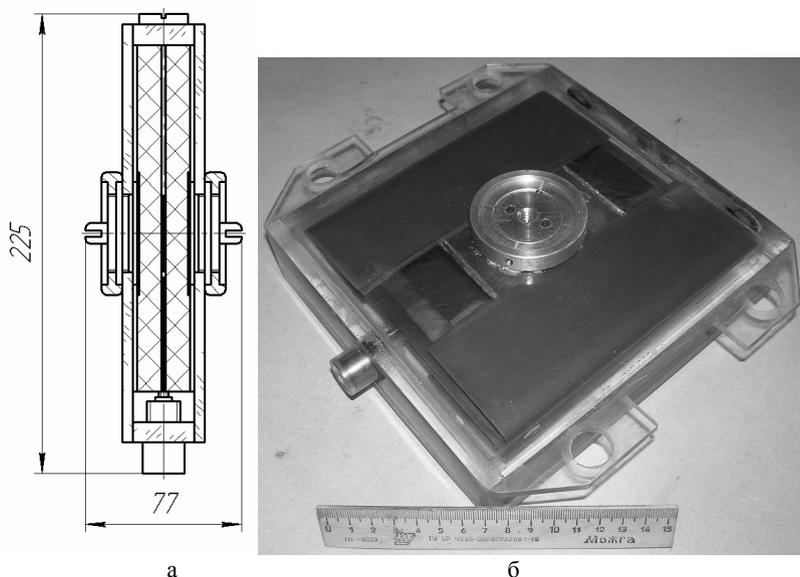


Рисунок 6 – Конденсатор КИМ-131: а – габаритные размеры, б – внешний вид

Выводы.

1. При разработке и конструировании высоковольтных импульсных конденсаторов пластинчатого типа с большой площадью запрессовки после-

довательно соединенных секций толщину рабочей изоляции секций необходимо выбирать в диапазоне 100-160мкм и с меньшим числом последовательно соединенных секций.

2. Разработаны конструкции импульсных конденсаторов с увеличенной толщиной рабочей изоляции.

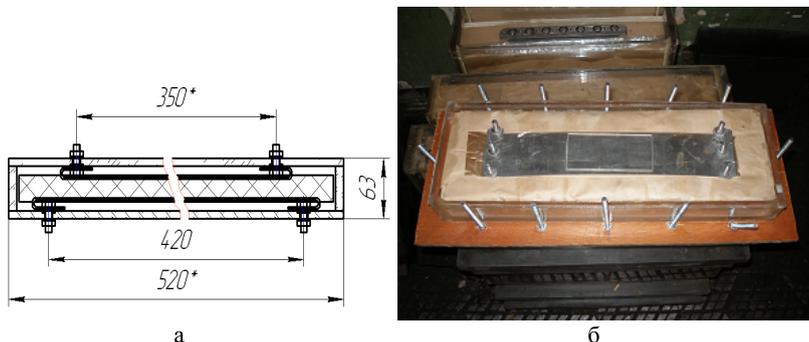


Рисунок 7 – Конденсатор КИМ-134: а – габаритные размеры, б – внешний вид в состоянии изготовления на прессующем приспособлении

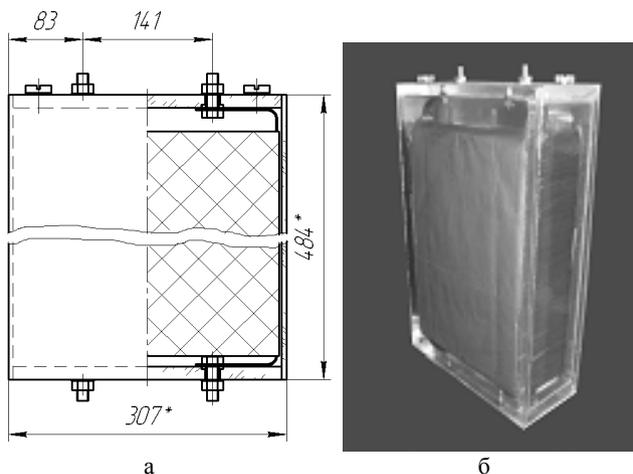


Рисунок 8 – Конденсатор КИМ-136: а – габаритные размеры, б – внешний вид

Список литературы: 1. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Рудаков С.В. Влияние технологического допуска по емкости на схему соединения секций высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХП». – №35. – 2004. – С.136-143. 2. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю. Экспериментальное определение показателей надежности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №1. – С. 71-75.

Поступила в редколлегию 05.10.2006.