
ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.С. Швец

ОЦЕНКА ДОСТИГНУТОГО УРОВНЯ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ЗАПАСАЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Высоковольтные импульсные конденсаторы широко применяются в различных областях науки и техники в качестве накопителей электрической энергии генераторов импульсных токов (ГИТ) и напряжений (ГИН). Во всем мире постоянно ведутся работы по созданию малогабаритных ГИТ и ГИН. Одним из возможных решений поставленной задачи является повышение удельных энергетических характеристик применяемых высоковольтных импульсных конденсаторов, таких как удельные запасаемые энергии по массе и объему, и ресурса.

В настоящее время в энергоемких импульсных конденсаторах в качестве диэлектрика используется, в основном бумажная, бумажно-пленочная изоляция, пропитанная касторовым маслом. Выпускаемые высоковольтные импульсные конденсаторы в зависимости от срока службы, общей энергоемкости, условий эксплуатации имеют предельные удельные характеристики.

Лидирующее положение за рубежом в области создания высоковольтных импульсных конденсаторов с высокой удельной запасаемой энергией принадлежит США – Национальной лаборатории Сандия (штат Нью-Мексико), г. Альбукерке и Электротехнической компании “Максвелл” (штат Калифорния), г. Сан-Диего.

В СНГ созданием высоковольтных импульсных конденсаторов занимаются ОАО СКЗ КВАР, г. Серпухов, Московской обл., СПбГТУ и НИИ ГИРИКОНД, г. Санкт-Петербург, Россия; КБ при ОАО УККЗ, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; ИИПТ НАН Украины, г. Николаев, НИПКИ “Молния”, г. Харьков, Украина.

Следует отметить достаточно объективного сравнительного анализа характеристик высоковольтных импульсных конденсаторов, изготавливаемых за рубежом и в СНГ, крайне ограничены предложения по повышению удельной запасаемой энергии высоковольтных импульсных конденсаторов.

Поэтому целью данной работы является определение достигнутого уровня в области создания высоковольтных импульсных конденсаторов, поиск путей повышения их удельных характеристик.

Определенные трудности проведения анализа заключаются в том, что высоковольтные импульсные конденсаторы в отличие от других электрических конденсаторов являются специфическим изделием. Они изготавливаются малыми партиями и по определенному заказу они могут использоваться одновременно как в открытых, так и в закрытых технологиях, и поэтому информация о них носит в основном рекламный характер при отсутствии полной информации о характеристиках конденсаторов.

Нами проведен тщательный обзор имеющихся источников научно-технической литературы и для оценки и сравнения выбраны высоковольтные импульсные конденсаторы, выпускаемые различными фирмами и имеющие наибольший объем информации по техническим характеристикам (см. таблицу).

Сравнивая между собой конденсаторы на номинальное напряжение 50 кВ, средним ресурсом 10^8 зарядов-разрядов фирмы “Максвелл”, США, модель 37330 и конденсатор ИК-50-0,5 ИИПТ НАН Украины, видно, что они имеют близкие значения удельных запасаемых энергий по объему и массе.

Технические характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов

Страна, фирма	Тип, модель	U _н , кВ	C _н , мкФ	W _к , Дж	W _{уд}		L _к , нГн	Средний ресурс, зарядов-разрядов	Режим работы	I _м , кА	f, Гц	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
					по объему, Дж/дм ³	по массе, Дж/г							
США "Максвелл" г. Сан-Диего	30665	7,5	20	562,5	189,2	0,125	90	10 ⁵	К	25	–	96x116x267	4,5
	30560	15	2	225	165,3	0,12	110	2,5·10 ⁵	К	25	–	81x96x175	1,9
	37330	50	0,1	125	29	0,023	15	10 ⁸	К	50	–	58x150x495	5,4
	37331	50	0,15	187,5	30,8	0,024	15	8·10 ⁷	К	50	–	58x150x699	7,7
	31433	50	0,25	312,5	71,5	0,07	60	3·10 ⁴	К	50	–	102x153x280	4,5
	31434	50	1,1	1375	119,5	0,092	60	3·10 ⁴	К	25	–	102x153x737	15
Россия ОАО СКЗ КВАР, г. Серпухов	ИК-8-85 УХЛ 4	8	85	2720	99,1	0,054	60	–	К	40	0,0167	310x150x590	50
	ИК1-10-50 УЗ	10	50	2500	91,1	0,05	60	10 ⁴	К	40	0,0167	310x150x590	50
	ИК-50-1,35 УХЛ4	50	1,35	1687,5	25,5	0,015	550	10 ⁷	А	20	0,033	314x314x670	110
	ИК-50-3,3 УХЛ4	50	3,3	4125	62,4	0,038	35	3·10 ⁴	К	200	0,05	3314x314x670	108
	ИКМ-50-6 УХЛ4	50	6	7500	113,5	0,068	20	2·10 ⁴	А	60	1-10	314x314x670	110
	ИКМ1-50-9 УХЛ4	50	9	11250	340,6	0,2	60	2·10 ⁴	А	60	0,01-1	314x314x335	55
ИКМ2-50-12 УХЛ4	50	12	15000	227,1	0,15	20	2·10 ⁴	А	100	0,01-1	314x314x670	100	
Казахстан ОАО УККЗ, г. Усть-Каменогорск	ИМ-5-140 УЗ	5	140	1750	46,4	0,032	–	–	К	–	–	380x120x827	55
	ИЭ-12-50-2 УЗ	12	50	3600	95,5	0,072	–	–	К	–	–	380x120x827	50
Украина ИИПТ НАН Украины, г. Николаев	ИК-6-250	6	250	4500	181	0,12	400	6·10 ⁴	К	10	0,2	310x160x500	38
	ИК-10-20	10	20	1000	45	0,032	800	2,7·10 ⁶	К	5	0,5	455x150x326	31
	ИК-25-16	25	16	5000	158	0,083	70	10 ⁵	К	50	0,016	235x255x550	60
	ИК-50-0,5	50	0,5	625	28,2	0,02	500	10 ⁸	К	5	10	455x150x326	31
	ИК-50-1	50	1	1250	56,2	0,04	400	1,5·10 ⁷	К	10	2	455x150x326	31
	ИКЭ-100-0,17	100	0,17	850	135	0,139	70	2·10 ³	К	40	0,016	303x124x142	6
Украина НИПКИ "Молния", г. Харьков	КИМ-77	5	120	1500	105	0,045	50	5·10 ⁴	К	120	–	138x405x315	33
	КИМ-70	10	27	1350	135	0,058	60	10 ⁵	К	120	–	120x260x440	23
	КИМ-103	10	50	2500	125	0,062	60	5·10 ⁴	К	75	–	260x240x490	40
	КИМ-59	50	0,1	125	41,7	0,025	30	3·10 ⁸	К	90	–	100x100x300	5
	КИМ-23А	50	7,5	9375	93	0,047	25	7·10 ⁴	К	50	–	290x520x880	200
	КИМ-53	100	0,1	500	15	0,014	40	3·10 ⁴	К	80	–	85x400x980	36

Так, у конденсатора модели 37330 удельная запасаемая энергия по объему составляет 29 Дж/дм^3 , по массе – $0,023 \text{ Дж/г}$, а у конденсатора ИК-50-0,5 – по объему – $28,2 \text{ Дж/дм}^3$, по массе – $0,02 \text{ Дж/г}$.

При сравнении конденсаторов с высокими значениями удельной запасаемой энергии следует отметить, что при почти равных значениях удельной запасаемой энергии конденсатор ИК-6-250, созданный ИИПТ НАН Украины, с удельной запасаемой энергией по объему – 181 Дж/дм^3 , по массе – $0,12 \text{ Дж/г}$ в сравнении с конденсатором модели 30665 фирмы «Максвелл» с удельными характеристиками соответственно $189,2 \text{ Дж/дм}^3$ и $0,125 \text{ Дж/г}$ имеет в 1,67 раза меньший ресурс – $6 \cdot 10^4$ против 10^5 зарядов-разрядов.

При сравнении этого же конденсатора модели 30665 с конденсатором ИК-25-16 ИИПТ, видно, что при равном ресурсе 10^5 зарядов-разрядов конденсатор ИК-25-16 имеет удельную запасаемую энергию 158 Дж/дм^3 , в 1,2 раза меньше по сравнению с $189,2 \text{ Дж/дм}^3$.

Возможной причиной различия ресурсов конденсаторов (при условии равенства удельной запасаемой энергии) при использовании в качестве диэлектрика бумажной или бумажно-пленочной изоляции, пропитанной жидким диэлектриком, могут быть конструктивные особенности конденсатора модели 30665 фирмы «Максвелл», приводящие к повышению пробивной напряженности бумажной или бумажно-пленочной изоляции. Повышение пробивной напряженности может осуществляться как за счет изменения приэлектродных условий на границе раздела, металл–диэлектрик, так и за счет выравнивания неравномерности распределения напряжения на последовательно-соединенных секциях.

Применение в качестве пропитывающего диэлектрика бумажной или бумажно-пленочной изоляции жидкости с повышенной электрической прочностью, газостойкостью и стойкостью к частичным разрядам по сравнению с касторовым маслом также может привести к повышению ресурса при условии сохранения равными удельных запасаемых энергий.

Если сравнивать между собой конденсаторы на номинальное напряжение 50 кВ , средним ресурсом порядка 10^7 зарядов-разрядов ИК-50-1,35, ОАО СКЗ КВАР, и конденсатор ИК-50-1, ИИПТ НАН Украины, то видно, что у конденсатора ИК-50-1 выше значения по удельной запасаемой энергии более чем в 2 раза, а по среднему ресурсу – в 1,5 раза. Так, у конденсатора ИК-50-1,35 удельная запасаемая энергия по объему – $25,5 \text{ Дж/дм}^3$, массе – $0,015 \text{ Дж/г}$, а у конденсатора ИК-50-1 – $56,2 \text{ Дж/дм}^3$ и $0,04 \text{ Дж/г}$, средние ресурсы соответственно 10^7 и $1,5 \cdot 10^7$ зарядов-разрядов.

ОАО СКЗ КВАР Россия созданы высоковольтные импульсные конденсаторы с высокими значениями удельной запасаемой энергии ИКМ-50-6 с удельной запасаемой энергией по объему – $113,5 \text{ Дж/дм}^3$, массе – $0,068 \text{ Дж/г}$; ИКМ1-50-9 с удельной запасаемой энергией по объему – $340,6 \text{ Дж/дм}^3$, массе – $0,2 \text{ Дж/г}$; ИКМ2-50-12 с удельной запасаемой энергией по объему – $227,1 \text{ Дж/дм}^3$, массе – $0,15 \text{ Дж/г}$ с малым средним ресурсом $2 \cdot 10^4$ зарядов-разрядов. Конденсаторы предназначены для работы в режиме аperiodического разряда. Столь высокие значения удельной запасаемой энергии у этих конденсаторов получены за счет значительного снижения среднего ресурса и перехода к облегченному режиму работы – аperiodическому разряду.

НИПКИ «Молния» созданы высоковольтные импульсные конденсаторы с высокими значениями удельной запасаемой энергии КИМ-103 с удельной запасаемой энергией по объему 125 Дж/дм^3 , массе – $0,062 \text{ Дж/г}$ с ресурсом $5 \cdot 10^4$ зарядов-разрядов и КИМ-70 с удельной запасаемой энергией по объему 135 Дж/дм^3 , массе – $0,058 \text{ Дж/г}$ с ресурсом 10^5 зарядов-разрядов.

Такие результаты получены на основании развитой концепции «напряженного объема», заключающейся в том, что ресурс изоляции есть функция обратно пропорциональная объему изоляции, в котором напряженность электрического поля имеет повышенные значения [1].

По-видимому, для указанных ресурсов, учитывая результаты работы [2], удельные запасаемые энергии конденсаторов с бумажной или бумажно-пленочной изоляцией являются предельными.

С учетом опыта научных результатов бумажные и бумажно-пленочные высоковольтные импульсные конденсаторы будут и дальше использоваться, однако существует чрезвычайный интерес к повышению их удельных характеристик, например при использовании электротехнического оборудования в ограниченных объемах.

Выполненные в ИИПТ НАН Украины предварительные исследования показали, что повышение удельных энергетических характеристик, ресурса и частоты следования импульсов может быть достигнуто применением в качестве рабочего диэлектрика секций конденсаторов чисто пленочной изоляции, пропитанной неполярной жидкостью с высокой газостойкостью и стойкостью к частичным разрядам, с низким тангенсом угла потерь.

Применение чисто пленочной изоляции в конденсаторах позволяет повысить рабочую напряженность электрического поля в диэлектрике и увеличить по сравнению с бумажно-пленочной

удельную запасаемую энергию от 1,3 до 1,8 раза при одновременном увеличении ресурса, который зависит от режима эксплуатации.

Кроме того, применение чисто пленочного полипропиленового диэлектрика в высоковольтных импульсных конденсаторах приведет к существенному снижению потерь энергии в диэлектрике, повышению примерно в 3 раза частоты следования импульсов.

Таким образом проведенный анализ показал, что существуют ограничения по удельной запасаемой энергии и ресурсу при использовании в высоковольтных импульсных конденсаторах бумажного и бумажно-пленочного диэлектрика и требуется проведение дальнейших исследований по поиску новых материалов и путей повышения удельных энергетических характеристик высоковольтных импульсных конденсаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудаков В.В. Оптимизация конструкции электродных систем по концепции “напряженного объема” / В.В. Рудаков, А.Ю. Скрынник // Материалы XI Международной школы-семинара “Физика импульсных разрядов в конденсированных средах”, Николаев, август 2003 г. Николаев, 2003. С. 63–65.
2. Рудаков В.В. Опыт создания высоковольтных импульсных конденсаторов в НИПКИ “Молния” НТУ ХПИ / В.В. Рудаков, В.П. Кравченко, О.Ю. Дубийчук, А.Н. Золотухин // Там же. С. 132–133.

Поступила 29.12.03

Summary

Comparative analysis of characteristics of the high-voltage pulse capacitors which are produced by “Maxwell”, USA, “KVAR”, Serpukhov, Russia; “UKKZ”, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; IPRE NAS Ukraine, Nikolaev, Ukraine; “NIPKI MOLNIA”, Kharkov, Ukraine is carried out
