

---

## РЕФЕРАТ

Страниц 10, рисунков 1, таблиц 3.

### ОГРАНИЧИТЕЛЬ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВАРИСТОР, ПРОПУСК- НАЯ СПОСОБНОСТЬ, МАССОГАБАРИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИ- КИ

В работе произведено сравнение варисторов, изготовленных с 2000 по 2003 год различными российскими и зарубежными производителями, по следующим характеристикам: удельной поглощаемой энергии, плотности тока пропускной способности, массогабаритным характеристикам.

## Сравнение характеристик варисторов, используемых для комплектации нелинейных ограничителей перенапряжений отечественными производителями.

*А.А. Бойко, С.С. Данилевский, В.Л. Дмитриев, А.Н. Лубков.*

Технология изготовления оксидно-цинковых варисторов (ОЦВ) близка к технологии производства керамических конденсаторов. Специфика состоит в необходимости применения химически чистого исходного материала, соблюдения требований чистоты в процессе производства и тщательности перемешивания компонентов, близких к требованиям при производстве полупроводников. Основной компонент сырья — оксид цинка  $ZnO$  — является полупроводником  $n$ -типа с удельным объемным сопротивлением  $0,1 \div 1,0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Обжиг кристаллов  $ZnO$  в окислительной среде при температуре  $300^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению их проводимости на порядок и появлению нелинейных свойств (коэффициент нелинейности ВАХ  $\alpha = 0,3 \div 0,5$ ). Для резкого уменьшения  $\alpha$  варисторов оксид цинка смешивают с незначительным количеством оксидов других металлов: висмута ( $Bi_2O_3$ ), кобальта ( $CoO$ ,  $Co_2O_3$ ), марганца ( $MnO$ ), сурьмы ( $Sb_2O_3$ ). После перемешивания (как правило — мокрого, в шаровых мельницах) проводят формовку (прессование) ОЦВ при давлении  $30\text{--}40 \text{ МПа}$  и их обжиг в силитовых электропечах при температуре  $1200\text{--}1350^\circ\text{C}$  в присутствии кислорода.

Микроструктура полученных таким образом варисторов (рис. 1) включает в себя кристаллы оксида цинка 1 (полупроводник  $n$ -типа) размером  $1\text{--}10 \text{ мкм}$ , окруженные прослойкой 2 толщиной  $0,1\text{--}1,0 \text{ мкм}$  (полупроводник  $p$ -типа). Удельное объемное сопротивление кристаллов  $ZnO$  составляет  $1\text{--}10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , межкристаллической прослойки —  $10^{12}\text{--}10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Таким образом, варисторы на основе  $ZnO$  представляют собой систему последовательно и параллельно включенных  $p$ - $n$  переходов, которые и определяют их нелинейные свойства.

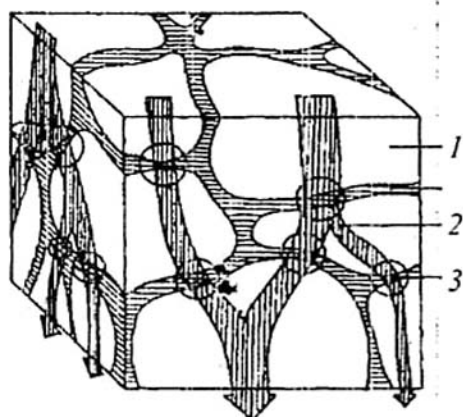


Рис. 1. Структура материала варисторов: 1 - кристаллы оксида цинка (р-полупроводник); 2 - межкристаллические прослойки (n-полупроводник); 3 - линии тока; 4 - активные зоны (р-п-переходов).

В настоящее время варисторы для ОПН выпускаются в виде цилиндров диаметром 28-120 мм и высотой 5-45 мм. На торцевые части дисков методом шоопирования наносятся металлические, чаще всего алюминиевые, электроды. Толщина слоя металлического покрытия составляет 0.05-0.30 мм. Для повышения пропускной способности при воздействии грозových импульсов тока на боковые поверхности варисторов наносят защитные покрытия (остеклование, глифталевая эмаль, специальные обмазки и т.п.).

Неоднородность структуры материала варисторов (см. рис. 1), обусловленная технологией изготовления, приводит к неравномерному, в значительной степени случайному распределению плотности тока по их объему. Соответственно, случайным образом изменяется и пропускная способность варисторов. Исследования показали, что пробой варисторов происходит преимущественно при протекании импульсов тока миллисекундного диапазона, характерных для коммутационных перенапряжений. При этом активные части р-п-переходов, плотность тока в которых наибольшая, подвергаются тепловому разрушению (выгоранию); соседние кристаллы ZnO соединяются и варисторы теряют свои нелинейные свойства.

На сегодняшний день за рубежом и некоторыми российскими производителями освоено производство варисторов с применением современных технологических процессов, обеспечивающих высокую стабильность электрических характеристик. Формообразование оксидно-цинковой керамики, металлизация и пайка металлических

электродов производится с применением ультразвука. С использованием этой технологии, например, "Завод Энергозащитных Устройств" изготавливает защитные устройства на основе варисторов диаметром 120 мм и высотой от 6 до 26 мм.

За последние 3 – 4 года в НИИПТ были проведены испытания варисторов, используемых для комплектации нелинейных ограничителей перенапряжений многими отечественными производителями. Варисторы, параметры которых будут рассмотрены далее, были произведены разными фирмами, по разным технологиям. В связи с этим, целью данной работы является проведение сравнительного анализа характеристик варисторов, изготовленных разными производителями. Для исследования были отобраны варисторы, изготовленные следующими производителями:

- НПО "Электрокерамика";
- Ningbo Zhenhai Guo Chuang High-Voltage Electric Apparatus Co., Ltd (КНР);
- "Завод электрозащитных устройств";
- НПО "Электрокерамика" (г. Сиань, КНР);
- EPCOS (Германия);
- Центр энергетических защитных аппаратов Ассоциации центров инжиниринга и автоматизации (ЦЭЗА АЦИА).

Сравнение варисторов проводилось по следующим характеристикам: удельной поглощаемой энергии, плотности тока пропускной способности и массогабаритным характеристикам.

Данные для сравнения были получены в результате испытаний образцов ОПН (секций или единичных варисторов) импульсом тока пропускной способности (в процессе рабочих испытаний и испытаний на пропускную способность). Испытывавшиеся варисторы представляли собой цилиндры диаметром от 28 до 78 мм и высотой от 8 до 45 мм, на боковую поверхность которых были нанесены различные защитные покрытия.

Пропускная способность является одним из важнейших параметров варисторов, характеризующих их способность поглощать и рассеивать энергию импульсов тока, протекающих через ОПН при ограничении перенапряжений. Для всех сравниваемых образцов ОПН, подвергавшихся испытаниям, в качестве импульса тока пропускной способности был использован прямоугольный импульс тока длительностью 2000 мкс. Это импульс прямоугольной формы, который быстро возрастает до максимального значения, остается практи-

чески постоянным в течение нормированного периода времени 2000÷2400 мкс, а затем быстро падает до нуля. Источником испытательных импульсов служил ГИН 4 МВ. Измерение амплитуд остающегося напряжения и испытательного импульса тока, а также длительностей импульсов и их фронтов, осуществлялось по осциллограммам, снятым с помощью осциллографа ОВ-1 по методике ГОСТ 17512-82. По полученным данным определялась энергия, поглощенная образцом.

Наибольшее длительно допустимое напряжение ( $U_{ндп}$ ) для испытанных секций ограничителей определялось в соответствии с принятыми соответствующим производителем правилами.

В табл. 1, колонка 6 приведено сравнение варисторов по удельной энергии поглощаемой образцом (отношение энергии к наибольшему длительно допустимому напряжению образца). Значения удельной поглощаемой энергии для образцов с различным диаметром сильно отличаются. Поэтому в седьмой колонке таблицы указаны значения удельной поглощаемой энергии, приведённые к площади поверхности образцов варисторов.

По данным табл. 1 можно сделать вывод, что наибольшую энергию могут поглотить варисторы, производства фирмы EPCOS (Германия) – 0,160÷0,185 Дж/(В\*см<sup>2</sup>). Варисторы остальных производителей по данному показателю значительно им уступают, за исключением варисторов, изготовленных "Заводом Энергозащитных Устройств" ("ЗЭУ") по новой технологии (0,151 Дж/В\*см<sup>2</sup>). Также следует отметить, что применение новой (ОЦВ.56227313.001ТУ) технологии в "ЗЭУ" позволило увеличить этот показатель почти в 2 раза.

Таблица 1

## Сравнение варисторов по удельной поглощаемой энергии

Фирма-производитель, марка, год изготовления	$N_{\text{вар}}$	$H_{\text{собр}}$ , мм	$D_{\text{вар}}$ , мм	$I_{\text{проб}}$ , А	$P_{\text{вз}}$ , кДж/кВ	$P_{\text{вз}}^*$ , кДж/(кВ*см <sup>2</sup> )
1	2	3	4	5	6	7
EPCOS, S10V-E48KV612E, 2002	1	34,5	48	500	2,90	0,16
EPCOS, S10V-E58SR133E, 2002	1	44	58	824	4,88	0,185
EPCOS, S10V-E78SR123E, 2002	1	44	78	1565	8,65	0,181
"Электрокерамика", КНР, 56 мм, 2000	2	45	56	400	2,17	0,088
"Электрокерамика", КНР, 70 мм, 2000	2	38	70	550	3,78	0,098
"Электрокерамика", КНР, 62мм, 2001	1	30	62	550	3,52	0,117
Ningbo..... Ltd (Китай), 48 мм, 2002	2	37,6	48	415	2,05	0,113
Ningbo..... Ltd (Китай), 71 мм, 2002	2	45	71	830	4,58	0,116
ИЗЭА АЦИА, 58 мм, 2002	2	24	58	570	2,85	0,108
"ЗЭУ", 46 мм, 2003	3	42,6	46	510	2,51	0,151
"ЗЭУ", 56 мм, 2002	3	30	56	430	2,15	0,087
НПО "Электрокерамика", 28 мм, 2001	4	40	28	92	0,67	0,109

Примечание к таблице 1:

$N_{\text{вар}}$  – количество единичных варисторов в испытываемом образце;

$H_{\text{обр}}$  – высота испытывавшегося образца;

$D_{\text{вар}}$  – диаметр варистора;

$P_{\text{уд}}$  – удельная поглощаемая энергия,  $P_{\text{уд}} = \frac{P}{U_{\text{ндр}}}$ , кДж/кВ;

$P_{\text{уд}}^*$  – удельная поглощаемая энергия на единицу площади поверхности

образца.  $P_{\text{уд}}^* = \frac{P}{U_{\text{ндр}} \cdot S_{\text{вар}}}$ , кДж/(кВ\*см<sup>2</sup>);

$S_{\text{вар}}$  – площадь поверхности варистора.

Следующим показателем, характеризующим качество изготовления варисторов, является допустимая плотность тока пропускной способности. В силу того, что получение однородной структуры варисторной массы является очень сложной технологической задачей, варисторы даже одной партии имеют отличающиеся значения максимального тока пропускной способности. Так как в аппарате недопустимо наличие вышедших из строя варисторов, значение тока пропускной способности для ограничителя перенапряжений выбирается производителем с некоторым запасом, что приводит к неэффективному использованию пропускной способности варисторов в ограничителях. Поэтому в настоящее время ведутся интенсивные работы по совершенствованию технологий изготовления варисторов, направленные на повышение однородности материала (размеров кристаллов ZnO, толщины межкристаллических прослоек, равномерного распределения легирующих добавок), что должно привести к увеличению плотности тока через варистор и снижению разброса пробивных токов варисторов. Результаты определения плотности тока пропускной способности испытанных варисторов приведены в табл. 2.

При анализе данных, представленных в табл. 2, необходимо отметить, что несмотря на незначительную разницу в удельных плотностях образцов (около 9%), допустимая плотность тока пропускной способности варисторов, производимых разными предприятиями, отличается почти в 2 раза. Использование варисторов с большей допустимой плотностью тока пропускной способности при комплектации ограничителей перенапряжений позволяет значительно улучшить их массогабаритные характеристики.

Таблица 2

## Сравнение варисторов по плотности тока пропускной способности

Фирма-производитель, марка, год	$D_{\text{вар}}$ мм	$\rho_{\text{обр}}$ гр/см <sup>3</sup>	$I_{\text{прон}}$ А	$S_{\text{обр}}$ см <sup>2</sup>	$j_{\text{прон}}$ А/см <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6
EPICOS, SIOV-E48KV612E, 2002	48	5,45	500	18,1	27,6
EPICOS, SIOV-E58SR133E, 2002	58	5,85	824	26,4	31,2
EPICOS, SIOV-E78SR123E, 2002	78	5,56	1565	47,8	32,8
"Электрокерамика", КНР, 56 мм, 2000	56	5,77	400	24,6	16,2
"Электрокерамика", КНР, 70 мм, 2000	70	5,77	550	38,5	14,3
"Электрокерамика", КНР, 62мм, 2001	62	5,80	550	30,5	18,2
Ningbo..., Ltd (Китай), 48 мм, 2002	48	5,44	415	18,1	22,9
Ningbo..., Ltd (Китай), 71 мм, 2002	71	5,44	830	39,6	21,0
ЦЭЗА АЦИА, 58 мм, 2002	58	5,84	570	26,4	21,6
"ЗСУ", 46 мм, 2003	46	5,65	510	16,0	30,7
"ЗСУ", 56 мм, 2002	56	5,82	430	24,6	17,5
НПО "Электрокерамика", 28 мм, 2001	28	5,38	92	6,2	14,9



Примечание к таблице 2:

$I_{\text{проп}}$  — амплитуда испытательного импульса тока пропускной способности;

$j_{\text{проп}}$  — плотность испытательного тока пропускной способности,

$$j_{\text{проп}} = \frac{I_{\text{проп}}}{S_{\text{вар}}}, \text{ А/см}^2;$$

$\rho_{\text{обр}}$  — плотность образца, гр/см<sup>3</sup>.

В связи с тем, что в настоящее время активно внедряются в эксплуатацию подвесные ОПН, большое значение имеет их масса, значительную часть которой составляет масса столба варисторов. В табл. 3 представлено качественное сравнение объема и массы варисторов, необходимых для поглощения энергии условного импульса пропускной способности (произвольно выбрано значение энергии равное 1 МДж, что эквивалентно энергии, выделяющейся в ОПН 220 кВ при воздействии импульса тока пропускной способности с амплитудой 550 А). Для этого рассчитана поглощаемая единицей объема энергия при воздействии импульса тока пропускной способности (колонка 4, табл. 3). При расчете предполагалось, что напряжение равномерно распределено вдоль столба варисторов ограничителя. Из табл. 3 (графа 4) видно, что использование более энергоёмких варисторов позволяет уменьшить массу и высоту (что важно для ограничителей, встраиваемых в, элегазовое и маслонеполненное оборудование) столба варисторов ограничителя в 1,5÷2 раза.

В заключении необходимо отметить, что приведенные данные получены в результате испытаний, направленных на подтверждение заявленных в технических условиях на ограничители перенапряжений параметров. Значение амплитуды тока пропускной способности, указанное в ТУ, может быть выбрано производителем ОПН с большим запасом относительно реальной пропускной способности используемых варисторов. Поэтому целесообразно в дальнейшем провести исследования по определению реальной пропускной способности варисторов разных производителей, а также исследования по определению реального ресурса варисторов при воздействии импульсов тока пропускной способности, с амплитудой, заявляемой в ТУ производителями ограничителей перенапряжений. Это даст возможность более объективно сравнить варисторы, рассмотренные в данной работе.

Таблица 3

## Сравнение массогабаритных характеристик ограничителей

Фирма-производитель, марка, год	$D_{\text{вн}}^*$ мм	$\rho_{\text{обр}}^*$ гр/см <sup>3</sup>	$\rho_{\text{вл}}^{**}$ , $\frac{D_{\text{жв}}}{\text{см}^3}$	N, штук	m, кг	$V_{\Sigma}$ , дм <sup>3</sup>	$\Pi_{\Sigma}$ , у.е.
1	2	3	4	5	6	7	8
ERCOS, SIOV-E48KV612E, 2002	48	5,45	156,8	102	34,7	6,38	10,4
ERCOS, SIOV-E58SR133E, 2002	58	5,85	170,1	50	34,4	5,88	9,5
ERCOS, SIOV-E78SR123E, 2002	78	5,56	164,1	29	33,9	6,09	9,9
"Электрокерамика", КНР, 56 мм, 2000	56	5,77	95,0	190	60,8	10,53	17,1
"Электрокерамика", КНР, 70 мм, 2000	70	5,77	109,8	125	52,5	9,11	14,8
"Электрокерамика", КНР, 62мм, 2001	62	5,80	130,6	85	44,4	7,66	12,4
Ningbo..... Ltd (Китай), 48 мм, 2002	48	5,44	126,4	233	43,0	7,91	12,8
Ningbo.... Ltd (Китай), 71 мм, 2002	71	5,44	120,4	93	45,2	8,31	13,5
ЦЭЗА АЦИА, 58 мм, 2002	58	5,84	98,6	320	59,2	10,15	16,5
"ЗДУ", 46 мм, 2003	46	5,65	123,6	343	45,7	8,09	13,1
"ЗДУ", 56 мм, 2002	56	5,82	98,1	414	59,3	10,19	16,6
НПО "Электрокерамика", 28 мм, 2001	28	5,38	98,3	1653	54,8	10,18	16,5

*Примечание к таблице 3:*

$P_{уд}$  – удельная энергия импульса тока пропускной способности на единицу объема образца,  $P_{уд} = \frac{P}{V_{обр}}$ , Дж/см<sup>3</sup>;

$V_{обр}$  – объем образца, см<sup>3</sup>;

$N$ ,  $m_z$ ,  $V_z$ ,  $H_z$  – количество, масса, объем и высота варисторов необходимые для поглощения энергии 1 МДж условного импульса пропускной способности. Высота приведена к площади поверхности варистора в условных единицах (за единицу площади поверхности принята площадь варистора диаметром 28 мм).

**Выводы:**

На основании проведенного сравнения варисторов разных производителей можно сказать что, наилучшими из рассмотренных характеристик обладают варисторы фирмы EPCOS (Германия).

Лучше из рассмотренных варисторов, электрические характеристики которых лишь немного уступают варисторам фирмы EPCOS, производятся на "Заводе энергозащитных устройств" по новой технологии (2003 год).

**Список использованных источников:**

1. Афанасьев А.И., Богатеньков И.М., Фейзуллаев Н.И. Аппараты для ограничения перенапряжений в высоковольтных сетях. Учебное пособие, Санкт-Петербург, Изд-во СПбГТУ, 2000;
2. Кабанов С.О., Красавина М.А. Ограничители перенапряжений – важнейший элемент обеспечения электромагнитной совместимости. Материалы международной научно-технической конференции 31 марта – 05 апреля 2003 г. Технологии координации изоляции и эксплуатации современных технических средств защиты от перенапряжений в сетях с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью. Стр. 212-220.