

Продолжение. Начало в №5'2009

Электронная компонентная база силовых устройств

Часть 4.1

Рассмотрены применяемые в настоящее время пассивные компоненты для силовых устройств, в том числе резисторы, конденсаторы, дроссели. Обзор дается для компонентов отечественного и зарубежного производства.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

В работах [1–3] дан обзор и приведены характеристики активных силовых полупроводниковых компонентов для широко распространенных классов современных силовых устройств (СУ). К ним относятся импульсные источники вторичного электропитания (ИВЭ), различные инверторы и преобразователи, регуляторы напряжения, устройства управления электроприводом и т. д. В основном предметом рассмотрения выбраны силовые электронные компоненты для применения в импульсных ИВЭ с мощностью более 500 Вт, для электроприводов и других СУ мощностью до 40 кВт, а в некоторых случаях до 100 кВт. Были рассмотрены главным образом характеристики и особенности силовых электронных ключей на токи от 10–20 до 200–250 А и более, с напряжениями от 100 до 1200–4500 В и более, как отечественного, так и зарубежного производства. Для иллюстрации возможностей силовых приборов также приведены параметры приборов на напряжения более 2000 В и токи более 1000 А.

Непосредственно в статьях [1–3] были описаны:

- диоды: низкочастотные и быстродействующие, включая диоды Шоттки [1];
- тиристоры: триодные, запираемые (GTO, GCT, IGCT), оптотиристоры [2];
- симисторы и оптосимисторы [2];
- полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) [3];
- биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [3];
- силовые модули, в том числе интегрированные силовые модули (IPM) [3].

Отмечено, что на рынке силовой электроники в России в последние годы значительно продвинулись вперед российские предприятия — производители силовых электронных компонентов на основе использования передовых зарубежных технологий и современного высокопроизводительного оборудования [4, 5].

Выбранная темой данной статьи номенклатура пассивных компонентов для СУ очень велика, что обусловлено широким диапазоном рядообразующих параметров, таких как номинальные значения сопротивления резисторов, емкости конденсаторов, индуктивности дросселей, а также мощность, напря-

жение и ток. В связи с этим подробное рассмотрение ее в рамках журнальной статьи не представляется возможным. Поэтому для иллюстрации возможностей пассивных компонентов ограничимся обзором отличительных особенностей и основных параметров только некоторых из них:

- стандартные постоянные резисторы (в том числе датчики тока — шунты);
- специальные резисторы: терморезисторы (термисторы) и варисторы;
- конденсаторы постоянной емкости;
- дроссели.

Стандартные постоянные резисторы

Стандартные резисторы изготавливаются чаще всего, из резистивных материалов или методом нанесения проводящих пленок (тонкопленочные или толстопленочные резисторы), или из проволоки с большим удельным сопротивлением, или из листового материала (например, для сильноточных измерительных шунтов).

Постоянные и переменные широко используются в слаботочных узлах силовых устройств. Резисторы малой (0,125–0,5 Вт) и средней (1–3 Вт) мощности применяются, как правило, в устройствах управления (УУ). Резисторы повышенной (5–15 Вт) и большой мощности используются для ограничения пусковых токов, для разряда энергоемких конденсаторов при отключении СУ, для измерения тока, в узлах ограничения скорости нарастания и фиксации напряжения на силовых ключах (диодах, транзисторах) и т. п. В последнем случае для так называемых RC-цепей (демпферы) и RCVD-цепей (снабберы — snabbers и кламперы — clampers) желательнее выбирать непроволочные «безындуктивные» резисторы, если они предназначены для обрамления быстродействующих силовых ключей. Поясним некоторые применения резисторов.

В импульсных источниках питания (без корректоров коэффициента мощности) при пуске из-за заряда конденсатора сетевого выпрямителя возникают большие пусковые токи (экстратоки). Во избежание значительных потерь мощности в стационарном режиме работы и снижения КПД использование

Таблица 1. Технические характеристики мощных резисторов зарубежного производства

Тип (фирма)	Особенности	$P_{рас}$ Вт (I_{max} А)	U_{max} В	R (допуск $\pm\gamma_R$ %)	$\alpha_{TR} \pm\%/^{\circ}C$	Примечание
VCS2516	Прецизионные фольговые низкоомные — датчики тока (шунты)	1 (5,0)		0,1–1 Ом (1,0)	0,00001–0,00008	Габариты 6,35×4,06×1,0 мм; T= –55...+125 °С.
CSM2512, CSM3637	Прецизионные фольговые низкоомные — датчики тока (шунты)	1 (18,0); 3 (38,0)		0,003–0,02 Ом (0,1–1); 0,002–0,02 Ом (0,1–1)	0,000015–0,000025	Габариты 0,25×0,125×0,025
MO-500	Металлооксидные	5	700	0,1 Ом–10 МОм (5)	0,0002	Габариты \varnothing 8×35мм; T= –55...+200 °С
KNP500	Проволочные	5	500	0,1 Ом–4 кОм (1; 5)	0,0003	Габариты \varnothing 8×38мм; T= –55...+250 °С
W22 (Welwyn)	Проволочные высокостабильные	6	200	0,1 Ом–20 кОм (5)	0,0075	
AX5W; AX9W; AX17W	Проволочные цементные	5; 9; 17		0,1 Ом–100 (33) кОм (5)		Аналог С5-16, аксиальные выводы
SQP-xx	Проволочные цементные	10; 15; 20; 25	750 (5 Вт); 1000	0,1 Ом–1 кОм (1; 5)	0,00035	Высокая перегрузочная способность. Габариты \varnothing 9,4–13,5×48–65 мм. T= –55...+250 °С
WHxx/WH5, WH10 (Welwyn)	Проволочные с радиатором-теплоотводом	5/10*–20/50*	160–1250	0,1 Ом–50 кОм (5)		*) с внешним теплоотводом-радиатором. $R_{изол} \geq 10^4$ МОм
MPR20 (Meggit)	Проволочные с радиатором-теплоотводом	20 Вт*	500	0,22 Ом–15 кОм (5)		*) с радиатором корпус ТО-220

постоянно включенных токоограничивающих резисторов возможно только для маломощных (до 30–50 Вт) импульсных ИВЭ. Токоограничительный резистор включается последовательно в цепь однофазного переменного тока или после сетевого выпрямительного моста (до конденсатора фильтра). В более мощных импульсных ИВЭ достаточно часто используют схемное решение, когда мощный постоянный резистор, включенный перед конденсатором сетевого выпрямителя, в конце пуска шунтируется автоматическим переключателем — сильноточным электромеханическим реле или тиристором. Недостатки такого решения: а) усложнение схемы; б) дозаряд конденсатора после замыкания переключателя, приводящий к значительным токам через конденсатор [6]. В другой работе [7] указано, что в разработанном автором статическом трехфазном инверторе 220 В 400 Гц мощностью 6 кВт с питанием от трехфазного напряжения 380 В 50 Гц описанная схема пуска в процессе пятнадцатилетней эксплуатации не отказала ни разу. Для разряда конденсаторов большой емкости используется мощный резистор с последовательно включенным сильноточным реле или тиристором. Особенно это важно для мощных импульсных ИВЭ и высоковольтных источников питания.

Стандартные постоянные резисторы имеют следующие параметры:

- номинальное сопротивление $R_{ном}$ (R_0) с допуском (отклонением) от номинального значения сопротивления $\pm\gamma_R$ (%);
- номинальная рассеиваемая мощность $P_{рас}$ или $P_{раб}$;
- максимально допустимый ток I_{max} (только для датчиков тока — измерительных шунтов);
- максимально допустимое постоянное, эффективное или импульсное напряжение U_{max} ;
- температурный коэффициент сопротивления ТКК/TCR или α_{TR} ($\pm\%/^{\circ}C$).

Для высокоомных и прецизионных резисторов имеет значение сопротивление изоляции $R_{изол}$ выводов относительно «тела» резистора.

Резисторы, в отличие от других устройств, являются наиболее простыми элементами, технология производства которых не претер-

певает таких быстрых изменений, как у активных компонентов. Поэтому отечественные резисторы по-прежнему достаточно широко применяются и в настоящее время. Единственное, но очень важное, затруднение заключается в малом объеме промышленного производства в России вообще и, соответственно, в недостаточных заказах пассивных компонентов отечественным предприятиям-изготовителям. Одним из основных производителей отечественных резисторов является ООО «Тензор» (Нижний Новгород). Приведем характеристики мощных проволочных резисторов отечественного производства [8]:

- прецизионные С5-5: $P_{рас} = 1–10$ Вт, $R_{ном} = 1$ Ом — 180 кОм, допуск $\gamma_R = (0,05–5)\%$;
- низкоомные С5-16: $P_{рас} = 1–16$ Вт, $R_{ном} = 0,1–10$ Ом, $\gamma_R = (0,5–5)\%$;
- общего применения С5-35В: $P_{рас} = 3–100$ Вт, $R_{ном} = 1$ Ом — 56 кОм, $\gamma_R = (5; 10)\%$.

Основные характеристики некоторых мощных резисторов зарубежного производства на основании [9] приведены в табл. 1.

Из зарубежных мощных (сильноточных) резисторов для примера остановимся на следующих:

- прецизионные фольговые низкоомные — датчики тока (шунты) CSM2512 (CSM3637) соответственно: $P_{рас} = 1$ (3) Вт; $I_{max} = 18$ (38) А; $R_{ном} = 0,003–0,02$ Ом; допуск $\gamma_R = (0,1–1)\%$; ТКК $\alpha_{TR} = 0,000015$ (0,000025) $\%/^{\circ}C$;
- проволочные цементные SQP-xx: $P_{рас} = 10–25$ Вт; $U_{max} = 750$ В; $R_{ном} = 0,1$ Ом — 1 кОм; $\gamma_R = (1; 5)\%$; ТКК $\alpha_{TR} = 0,00035\%/^{\circ}C$; высокая перегрузочная способность;
- проволочные с радиатором-теплоотводом WHxx (WH5, WH10, ...): $P_{рас} = 5$ (при перегрузке — 10)–20 Вт (при перегрузке — 50); $U_{max} = 160–1250$ В; $R_{ном} = 0,1$ Ом — 50 кОм; $\gamma_R = 5\%$.

Специальные резисторы

Специальными называются полупроводниковые резисторы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) сопротивления, зависящей от таких факторов, как температура (терморезисторы), напряжение (варисторы) и магнитное поле (магниторезисторы). Рассмотрим классы терморезисторов и варисторов.

Терморезисторы

Терморезисторы бывают с отрицательным температурным коэффициентом (NTC) сопротивления (термисторы) и с положительным температурным коэффициентом (PTC) сопротивления (позисторы). Мощные терморезисторы обоих типов используются для ограничения пусковых токов в силовых устройствах, в том числе в импульсных источниках питания. Исторически в мощных (до 1–1,5 кВт) импульсных ИВЭ с этой целью применялись мощные NTC-терморезисторы. В холодном состоянии (перед пуском) сопротивление NTC-терморезистора изначально большое, а к моменту окончания пуска оно уменьшается в 30–50 раз и более, что практически не снижает КПД источника. Недостаток решения — необходимость выдерживать некоторое время (1,5–3 с) для «остывания» терморезистора с целью восстановления его начального сопротивления. Это не всегда возможно, например, при несанкционированных отключениях/включениях электропитания, а также для аппаратуры оборонного назначения.

В последнее время для ограничения пусковых токов источников питания и СУ все большее применение находят мощные позисторы, у которых при нагреве сопротивление резко возрастает (на два порядка и более). При штатном включении СУ такой терморезистор, по существу, ограничивает величину зарядного тока конденсатора до безопасной величины. После окончания процесса заряда терморезистор шунтируется контактами силового реле. Если же возникают нештатные ситуации (аварии) — сбой в момент или после зарядки конденсатора, пробой (КЗ) конденсатора сетевого выпрямителя, неисправность реле, то при использовании постоянного (низкоомного) резистора возможен выход из строя самого резистора и других компонентов схемы. Именно в этих ситуациях PTC-терморезистор, быстро нагреваясь, переходит в высокоомное состояние, увеличивая свое сопротивление во много раз, вплоть до десятков килоом [10]. В этой же статье приведены результаты исследований применения PTC J204 фирмы EPCOS [11] с начальным сопротивлением 100 Ом $\pm 25\%$ (максимальное напряжение $U_{max} = 800$ В), используемых в схеме мощного выпрямителя в штатном и нештатном режимах. Выпрямитель питается от трехфазной сети 3×380 В, 50 Гц («треугольник») с конденсатором

Таблица 2. Технические характеристики мощных терморезисторов зарубежного производства

Тип (фирма)	Особенности	$P_{расч}$, Вт	U_{max} , В	I_{max} , А	R_0 [25 °C]/ R_T («горячий»), Ом (допуск $\pm \delta R_0$)	B , °К	Примечание
Серия SG (Rhopoint)	Терморезисторы с отрицательным ТКС (NTC)	–	–	30–1,75	1,0–33/0,01–0,6	–	Аналог TP-10. Габариты $\varnothing(12,7-31,8) \times (6,4-8,9)$ мм
Серия B5723xSxxxM (Epcos)		3,1	265	9–2,5	1,0; 2,2–33	2700–3600	Аналог TP-10 (функционально). Габариты $\varnothing 15 \times 7$ мм
PRG21BB150MB1RK (muRata)	Терморезисторы с положительным ТКС (PTC)	–	24	1,6	15 (20)	–	Габариты $\varnothing 2 \times 1,25$ мм, $T = -10...+60$ °C
Серия J20x: J201, J202, J203 (Epcos)		–	550; 650; 800	–	20 (30); 56 (30); 100 (25)	–	–

сглаживающего фильтра емкостью 940 мкФ. Для большей надежности использовано параллельное включение двух терморезисторов PTC J204.

Основные параметры терморезисторов в принципе такие же, как у резисторов. Отличие в том, что вместо номинального сопротивления $R_{ном}$ вводятся два значения: R_0 и R_T — начальное («холодное») и нагретое (под током) значения сопротивления. Кроме того, для них дополнительно вводится коэффициент температурной чувствительности или постоянная B_T (К), зависящие от физических свойств полупроводникового материала. Мощные терморезисторы выпускают как отечественные, так и зарубежные фирмы. Основным разработчиком отечественных терморезисторов, в том числе мощных, является ОАО «НИИ Гириконд» [12]. В частности, мощный дисковый NTC-терморезистор TP-10 изготавливается двух типов.

1-й предназначен для ограничения пусковых токов в таких СУ, как импульсные ИВЭ, в устройствах числового программного управления роботами, гибкими производственными линиями и т. д.

2-й — для ограничения пусковых токов, возникающих при включении ламп накаливания общего назначения в сеть, и увеличения срока их службы. Основные параметры TP-10-I: $R_0 = (47; 10; 5)$ Ом $\pm 20\%$; $R_{паб} = (0,5; 0,2; 0,11)$ Ом; $U_{max} = 220$ Вэф, $B_T = 3800 \pm 10\%$, $3500 \pm 10\%$, $3300 \pm 20\%$; габариты соответственно: $\varnothing 18, 21, 18$ мм, толщина 5 мм.

Основные параметры некоторых типов терморезисторов зарубежного производства приведены в табл. 2 на основании [9, 11]

Широко применяются NTC-терморезисторы серии B57xxxSxxxM фирмы Epcos [11]. Например, терморезистор B57237S229M имеет параметры: $R_0 = 2,2$ Ом; $I_{max} = 7$ А; $\varnothing 15$ мм; терморезистор B57364S109M: $R_0 = 1$ Ом $\pm 20\%$; $I_{max} = 16$ А; $B_T = 2800$.

Варисторы

Варисторы — нелинейные полупроводниковые резисторы, например металлоокисные (ZnO), у которых при достижении на них напряжения больше определенного порогового значения начинает резко падать сопротивление (до долей единиц ом). До этого момента сопротивление варистора остается достаточно высоким, до десятков килоом (в зависимости от типа), и варистор практически не потребляет энергии. При дальнейшем повышении входного напряжения собственно напряжение на варисторе и защищаемом элементе повышается несущественно, ток через варистор резко возрастает и избыток напряжения прикладывается к последовательному ограничительному импедансу. Иными словами, в целом варисторы имеют симметричную высоконелинейную (практически пороговую) ВАХ с пороговым напряжением 10–1000 В и обладают способностью поглощать (рассеивать) высокоэнергетические импульсы перенапряжений с токами до нескольких килоампер в импульсе.

Благодаря этим отличительным особенностям варисторы используются для ограничения импульсных перенапряжений, возникающих при быстрых переключениях силовых ключей (в частности, тиристоров), например, в сетях переменного тока.

Основные параметры варисторов:

- максимальная величина постоянного (импульсного) напряжения «открывания» варистора при классификационном токе (чаще всего 1 мА) $U_{max-};$
- максимальная величина действующего переменного напряжения «открывания» варистора при нормированном токе $U_{max-};$
- максимальный импульсный ток $I_{max};$
- максимальная средняя величина рассеиваемой мощности $P_{max};$
- максимально допустимая за время действия импульса энергия $E_{max}.$

Иногда приводится коэффициент нелинейности β , характеризующий отношение статического сопротивления в данной точке ВАХ к динамическому сопротивлению в той же точке, то есть $\beta = R_{стат}/R_{дин}$.

Варисторы выпускают отечественные и зарубежные компании EPCOS, Philips [13], Joyin и др. В [14] приведена таблица справочных данных варисторов некоторых фирм.

ОАО «НИИ Гириконд» является основным разработчиком и производителем отечественных варисторов, в том числе мощных, среди которых следует отметить дисковые типа ВР-9 (а, б, в), ВР-10, ВР-11, ВР-12 [12]. Приведем параметры некоторых из них:

- ВР-9а: $U_{max} = 68-680$ В (1 мА), допуск $\gamma U_{max} = (5; 10; 20)\%$; $I_{max} = 500; 1500$ Аимп (8/20 мкс); $E_{max} = 2,3-45$ Дж (8/20 мкс); $\beta = 25-30; \varnothing 19$ мм;
- ВР-12: $U_{max} = 150-470$ В (1 мА), $\gamma U_{max} = 10\%$; $I_{max} = 5000$ Аимп (8/20 мкс); $E_{max} = 38-119$ Дж (8/20 мкс); $\beta = 22-30; \varnothing 28$ мм;

Основные параметры некоторых типов варисторов зарубежного производства приведены в табл. 3 на основании [9, 11, 13].

Разнообразную гамму варисторов — по пороговому напряжению, максимальному импульсному току, поглощаемой энергии и конструктивному исполнению — выпускает ведущая фирма по пассивным компонентам EPCOS [9, 11]: дисковые (S14Kxx...S20Kxxx), квадратные выводные (Q14/Q20) и блочные (B32/B40/B60/B80). Общие параметры варисторов: время отклика — не более 25 нс; перегрузочная способность — не менее 2500 В; $R_{изол}$ — не менее 1000 МОм; $T = -40...+85$ °C. Приведем другие параметры высокоточных варисторов этой фирмы для использования на стороне однофазной и трехфазной сети переменного тока:

- Дисковый S20K275E3: $U_{max-} = 275$ Вэф, $U_{max} = 430$ В (1 мА) $\pm 10\%$; $I_{max} = 12000$ Аимп

Таблица 3. Основные характеристики некоторых типов зарубежных варисторов

Тип (фирма)	Особенности	$U_{max} = [1 \text{ мА}], \text{ В } (\gamma U_{max-}, \%)$	$U_{max-}, \text{ Вэф}$	$I_{max}, \text{ Аимп (8/20 мкс)}$	$P_{max}, \text{ Вт}$	$E_{max}, \text{ Дж (время импульса)}$	Примечание
595-30...300 (Philips)	Дисковые	430 (± 10)	30–300	–	0,6	12–117 (10–1000 мкс)	Габариты $\varnothing 17 \times 19$ мм
VR-14D (20D): 101K...430K	Дисковые	100–430	11–460	–	0,6–1	22–364 (1 мс)	Габариты $\varnothing 14$ (20) мм
SIOV –B722xxS (Epcos)	Дисковые	18–750 (± 10)	11–460	100–40000	0,4; 0,6;...	0,3–195 (до 10 мс)	Аналоги: ВР-1, ВР-9, ВР-12. Габариты $\varnothing 7-22,5 \times 3,5-8,2$ мм
SIOV –B722xxE (EPCOS), в том числе:							
SIOV- S14K275E2 [B72214S271K101]	Дисковые	430 (± 10)	275	6000	0,6	110 (2 мс)	Габариты $\varnothing 14$ мм
SIOV- S20K275E2 [B72220S271K101]	Дисковые	430 (± 10)	275	10000	1,0	215 (2 мс)	Габариты $\varnothing 22,5$ мм
SIOV- LS40K275OP [B72240L0271K100]	Дисковые	430 (± 10)	275	40000	–	550 (2 мс)	Габариты $37,6 \times 14,5 \times 40$
Q14/Q20 (EPCOS)	Квадратные выводные	205–510 (± 10)	130–320	8000/15000	0,8/1,2	75–235 (2 мс)	Габариты Q14/Q20: $10 \times (16,5/22,5) \times (5-6,3)$ мм
B32/B40/B60/B80 (EPCOS)	Блочные	120–1800 (± 10)	75–1100	$(25-100) \times 10^3$	1,2/1,4/1,6/2,0	190–6000 (2мс)	Габариты: B32/B40 – $60 \times 55 \times 14$ мм, B60 – $100 \times 100 \times 24$ мм, B80 – $135 \times 118 \times 27,7$ мм

- (8/20 мкс); $E_{\max} = 260$ Дж (2 мс); $P_{\max} = 1$ Вт; габариты: $\varnothing 22,5$ мм, толщина (b) 6,3 мм.
- Квадратный выводной Q20K300: $U_{\max} = 300$ Вэф, $U_{\max} = 470$ В (1 мА) $\pm 10\%$; $I_{\max} = 15000$ Аимп (8/20 мкс); $E_{\max} = 235$ Дж (2 мс); $P_{\max} = 1,2$ Вт; габариты: 10×22,5×6,1 мм.
 - Блочный В80К460: $U_{\max} = 460$ Вэф, $U_{\max} = 750$ В (1 мА) $\pm 10\%$; $I_{\max} = 100000$ Аимп (8/20 мкс), $E_{\max} = 2500$ Дж (2 мс); $P_{\max} = 2$ Вт; габариты: 135×118×27 мм.

Конденсаторы

В этой статье будем рассматривать только конденсаторы с постоянной емкостью (для сокращения — постоянные конденсаторы). Предварительно приведем некоторые сведения о классификации, используемых материалах и других особенностях этих компонентов [15]. По виду диэлектрика конденсаторы классифицируются по следующим группам:

- с органическим диэлектриком;
- с неорганическим диэлектриком;
- с газообразным диэлектриком;
- с оксидным диэлектриком;
- с двойным электрическим слоем.

Конденсаторы с органическим диэлектриком изготавливаются обычно намоткой тонких длинных лент конденсаторной бумаги, пленок или их комбинации с металлизированными или фольговыми электродами. Деление таких конденсаторов на низковольтные (до 1600 В) и высоковольтные (свыше 1600 В) носит чисто условный характер. По назначению и используемому диэлектрическому материалу низковольтные конденсаторы можно разделить на низкочастотные и высокочастотные. К низкочастотным пленочным относятся конденсаторы на основе полярных и слабополярных органических пленок: бумажные, металобумажные, полиэтилентерефталатные, комбинированные, лакопленочные, поликарбонатные и полипропиленовые. Тангенс диэлектрических потерь у этих конденсаторов имеет ярко выраженную зависимость от частоты. Они способны работать на частотах до 10^5 – 10^7 Гц при существенном снижении амплитуды переменной составляющей с увеличением частоты.

Высокочастотные пленочные конденсаторы выполняются на основе неполярных органических пленок, в частности полистирольных и фторопластовых, которые имеют малое значение тангенса диэлектрических потерь. Их материал не зависит от частоты и поэтому они допускают работу на частотах до 10^5 – 10^7 Гц. Верхний предел по частоте зависит от конструкции обкладок (в том числе индуктивности выводов), контактного узла и емкости.

В высоковольтных конденсаторах в качестве диэлектрика используют бумагу, полистирол, фторопласт (политетрафторэтилен), лавсан (полиэтилентерефталат), полипропилен и сочетание бумаги и синтетических пленок (комбинированные). Поскольку для этого типа конденсаторов главное требование — высокая электрическая прочность, то использование

комбинированного диэлектрика в наибольшей степени этому удовлетворяет.

В конденсаторах с неорганическим диэлектриком используются: керамика, стекло, стеклокерамика, стеклокерамика и слюда. Обкладки выполняются в виде тонкого слоя металла, нанесенного на диэлектрик путем непосредственной его металлизации, или тонкой фольги. Высоковольтные конденсаторы делают в основном из керамики. Для высоковольтных НЧ-конденсаторов используется керамика с большой величиной диэлектрической проницаемости ϵ , что обеспечивает большую удельную энергию. Высоковольтные ВЧ-конденсаторы должны выдерживать большую реактивную мощность, поэтому они изготавливаются из керамики с малыми диэлектрическими потерями (низкое значение $\text{tg}\delta$). Их конструкция и выводы проектируются с учетом прохождения больших токов. Помехоподавляющие конденсаторы используются для подавления промышленных и ВЧ-помех. Подробнее их особенности будут приведены в следующей статье.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком (старое название — электролитические) делятся на конденсаторы общего назначения, неполярные, высокочастотные, импульсные, пусковые и помехоподавляющие. В качестве диэлектрика в них используется оксидный слой, образуемый на аноде. В зависимости от материала анода оксидные конденсаторы подразделяются на алюминиевые, танталовые и ниобиевые. Конденсаторы общего назначения имеют униполярную проводимость и применяются наиболее широко. Они характеризуются наибольшими значениями удельной емкости (до 66 мкФ/см³ и более) для низких напряжений и удельного заряда (0,0025 Кл/см³ и более) для повышенных напряжений (>100 В). Поэтому такие конденсаторы имеют наибольшую номинальную емкость (до 47000 мкФ и более), выпускаются на напряжения из ряда 3,3–450 (600) В и являются низкочастотными. Высокочастотные оксидные конденсаторы (алюминиевые жидкостные и танталовые оксидно-полупроводниковые) широко применяются в импульсных ИВЭ, узлах управления СУ в качестве фильтрующих и развязывающих элементов. Такие конденсаторы допускают работу в частотном диапазоне пульсаций выпрямленного напряжения в десятки и сотни килогерц. Пусковые неполярные конденсаторы применяются для облегчения пуска асинхронных двигателей, при этом, благодаря запасенной энергии, вращающееся электромагнитное поле двигателя приближается к круговому, и пусковой момент увеличивается.

В целом конденсаторы имеют следующие основные параметры:

- номинальная емкость $C_{\text{ном}}$ с допуском $\pm\gamma_C$ (%);
- температурный коэффициент емкости (ТКЕ) — α_{TC} ;
- максимально допустимое рабочее напряжение (номинальное, постоянное) $U_{\text{ном}}$ или U_{max} ;

- максимально допустимое переменное напряжение U_f или U_{max} , функционально зависящее от рабочей частоты (f_C);
- максимально допустимый переменный ток (номинальный ток) $I_{\text{ном}}$ или I_{max} , функционально зависящий от рабочей частоты (f_C);
- максимально допустимая реактивная мощность $P_{\text{вар}}$, также в зависимости от частоты;
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ при нормированной частоте работы;
- сопротивление электроизоляции $R_{C \text{ изол}}$, определяющее ток утечки конденсатора $I_{\text{ут}}$.

Поскольку ток утечки $I_{\text{Cут}}$ конденсатора зависит от произведения CU_{max} , то иногда для ряда конденсаторов какого-то определенного типа задается постоянная времени разряда заряженного конденсатора $\tau_C = CR_{C \text{ изол}}$ (сек), если C дано в мкФ, а $R_{C \text{ изол}}$ — в МОм. Дополнительные параметры конденсатора: эквивалентное последовательное сопротивление R_C (ESR — Equivalent Series Resistance) и эквивалентная последовательная индуктивность L_C (ESL — Equalent Series L). Эти паразитные параметры, особенно R_C , зависят от частоты. Поэтому и полное сопротивление (импеданс) конденсатора $Z_C = F(f_C)$ функционально зависит от частоты. Благодаря этому частотная характеристика $Z_C = F(f_C)$ имеет резонанс. При этом на частотах, меньших частоты собственного резонанса — $f_C < f_{C \text{ рез}}$, импеданс конденсатора имеет емкостной характер, а на частотах, больших $f_C > f_{C \text{ рез}}$, — индуктивный характер.

Для всех конденсаторов в технических условиях также указывается срок службы T_0^* (долговечность) при максимальной рабочей температуре. В справочных данных обычно этот параметр приводится только для силовых и электролитических конденсаторов, работающих в наиболее напряженных режимах и вдобавок наименее надежных. Типовыми значениями срока службы для зарубежных конденсаторов являются: $T_0^* = 2000$ ч (при +85 или +105 °С) и $T_0^* = 5000$ ч (при +85 °С) для высоконадежных конденсаторов.

Отечественная промышленность выпускала широкую номенклатуру конденсаторов всех типов, из которых, к сожалению, не все поставляются вследствие неблагоприятных условий для нормального функционирования многих отечественных предприятий. Основным разработчиком, а в ряде случаев — производителем отечественных конденсаторов является ОАО «НИИ Гириконд» [12]. Очень часто, ввиду отсутствия на складе отечественных конденсаторов, российские дистрибьюторы предлагают на замену импортные аналоги. Так, «НПК Планар» [16], являясь официальным представителем в России компании Supertech Electronic (Тайвань), предлагает электролитические и керамические конденсаторы различных типов, в том числе для поверхностного монтажа (SMD).

Рассмотрим выборочно номенклатуру конденсаторов отечественного производства. Керамические конденсаторы — низковольтные и высоковольтные — имеют параметры:

- Низковольтные многослойные монолитные:

- K10-17-1-4: $C_{ном} = 2,2$ пФ — 2,2 мкФ; $U_{ном} = 40-160$ В; $P_{вар} = 0,5-40$ ВАР;
- K10-47a, в: $C_{ном} = 10$ пФ — 2,2 мкФ; $U_{ном} = 500-25$ В; $P_{вар} = 1-40$ ВАР; $tg\delta \leq 0,035$ — для H30, H90; $R_{C_{изол}} \geq 4000$ МОм; $\tau_C = 100$ с (МОм×мкФ).
- Высоковольтные типа K15-5: $C_{ном} = 68-22000$ пФ; $U_{ном} = 1,6-6,3$ кВ; $P_{вар} = 2-100$ ВАР; $tg\delta \leq 0,002$ — для H50, 0,035 — для H20, H70; $R_{C_{изол}} \geq 10000$ МОм.
Полиэтилен-терафталатные конденсаторы имеют параметры:
- K73-17: $C_{ном} = 0,01-4,7$ мкФ; $U_{ном} = 630-63$ В; $tg\delta \leq 0,008$ — для H50, 0,035 — для H20, H70; $R_{C_{изол}} \geq 30000$ МОм;

- K73-50 (АДПК.673633.014ТУ): $C_{ном} = 0,33-150$ мкФ; $U_{ном} = 1600-63$ В; $tg\delta \leq 0,012$; $\tau_C = 2000$ с (МОм×мкФ); $T_0^* = 10000$ ч.
Пусковые конденсаторы типа K78-17 (зарубежный аналог — СВВ60): $C_{ном} = 3-45$ мкФ, $U_{ном} = 450$ (630) В.
В настоящее время все еще находят применение отечественные алюминиевые оксидно-электролитические конденсаторы общего назначения, разработанные в 1980–90 гг., в частности:
- K50-18: $C_{ном} = 4700-47000$ мкФ, $U_{ном} = 250-3,2$ В;
- K50-24: $C_{ном} = 22-10000$ мкФ, $U_{ном} = 160-6,3$ В;
- K50-38: $C_{ном} = 1-10000$ мкФ, $U_{ном} = 160-6,3$ В;
- K50-68 (взамен K50-35, K50-38).

В табл. 4 приведены основные параметры некоторых типов конденсаторов зарубежного производства на основании [9, 17–20].

Из приведенных в табл. 4 особого внимания заслуживают электролитические силовые конденсаторы типа PH600Vxxx фирмы Hitachi-AIC, имеющие следующие параметры: $C_{ном} = 1200; 2200; 3300$ мкФ; $U_{ном} = 600$ В; $T_0^* = 6000$ ч; габариты $\varnothing 64 \times 96; \varnothing 77 \times (115, 155)$ мм, винтовые выводы.

Среди специальных отметим силовые конденсаторы немецкой фирмы Electronicon [21], предназначенные для компенсации реактивной мощности в сетях переменного тока — однофазных и трехфазных («треугольник», «звезда») — частоты

Таблица 4. Основные параметры конденсаторов постоянной емкости зарубежного производства

Тип (фирма)	Особенности	C [γC, %]	U _{max} = , В	α _{T,C} %/°C	U _{max} - r Вампл [I _{max} - r / A / f, кГц]	tgδ (U _{max} = , В)	R _{экв} / Z _r *, Ом (f, кГц)	R _C полн, МОм (I _r , мкА)	Примечание
Керамические									
R20x-серия (Hitano)	Многослойные низковольтные	1000 пФ–2,2 мкФ ±[5; 10; 20]	25; 50; 100	±0,003	–	–	–	10 ⁴	Габариты $\varnothing(3,8-5) \times (2,5-3) \times (3,8-6)$ мм
SR21/Skycap-серия (AVX)	Многослойные низковольтные	10 пФ–2,2 мкФ ±[5–NPO]	100	±(0,003–1)	–	–	–	(1–10) × 10 ⁴	Габариты $\varnothing 3,08 \times 5,08 \times 7,62$ мм, T = –55...+125 °C
DE(A/B/C)xx-серия (Murata)	Высоковольтные дисковые	47–10000 пФ ±[±5; ±10; +80, –20]	(1; 2; 3; ×15; 6,3) × 10 ³	–	–	–	–	10 ⁴	Габариты $\varnothing 4,5 \times 7,5$ мм, T = –25...+85 °C
E5P (Z5)-серия (Hitano)	Высоковольтные	100–1000 ... 22000 пФ	(2–15) × 10 ³	–	–	–	–	10 ⁴	Аналог – K15-5 Габариты $\varnothing 7-24$ мм, T = –25...+85 °C (Y5P), T = –10...+70 °C (Z5)
Пленочные полиэтилен-терафталатные									
Серия MKT-1813 (Vishay)	Металлизированные (polyester)	0,01–10 мкФ [±10]	63, 250, 400, 630	–	40; 160; 220	–	–	–	Аналог – K73-11. Габариты $\varnothing(5-21) \times (11-41,5)$ мм – аксиальные выводы, T = –55...+100 °C
Серия MKS2, (Wima)	Металлизированные (polyester)	0,01–0,068... 0,15–3,3 мкФ [±10]	50–100	±0,033	–	–	cosφ = 0,008 (1кГц)	≤ 3 × 10 ⁴ [°C = 1000 с]	Аналоги – K73-17, K73-39. Габариты 7,2×(2,5–7,2)×(6,5–13) мм, T = –55...+100 °C
Серия MKS4 (Wima)	Металлизированные (polyester)	0,01–6,8 мкФ [±10]	63–400	≤±0,03	40–200	–	cosφ = 0,008 (1кГц)	≤ 3 × 10 ⁴ [°C = 1000 с]	Аналоги – K73-17, K73-39. Габариты $\varnothing 4 \times 9 \times 13$ мм (0,47 мкФ, 63 В), T = –55...+100 °C
Электролитические									
2222 037-серия (BC components)	Миниатюрные общего назначения	1, 100, 1000, 4700 мкФ [± 20]	10, 25, 100	–	(18–1800) × 10 ^{–3} [0,1]	–	–	≤ 0,01 × CU _{max} = +3	Аналог – K50-68. T ₀ * = 2000 ч (+85 °C) Габариты $\varnothing(2,6,3) \times \geq 11$ мм, T = –40...+85 °C
СВ-серия (Multicomp)	Танталовые общего назначения	0,1, 1, 10, 100; 220 мкФ [±20]	6,3; 10; 16; 25; 35	–	–	–	5; 1,7; ,8 (100)	(≤0,83–1,2; 6,6)	Аналог – K53-19. Габариты $\varnothing(5-9) \times (7-14)$ мм – радиальные выводы, T = –55...+85 (125) °C
PSM-SI 056, 057 (Philips)	Силовые (P), стандартные (S), миниатюрные (M)	100; 220; 470; 1000; 10000; 47000 мкФ [±20]	10; 16; 25; 385; 400	–	–	–	0,03–1,4 (0,1)	(0,23–4,5/1 мин)	Аналог – K50-18. T ₀ * = 2000 ч (+85 °C). С заостренными выводами (Snap-in). Габариты $\varnothing(25-35) \times 50$ мм. T = –40...+85 °C
PH600V122YD096, PH600V222YE115, PH600V332YE155 (все Hitachi-AIC)	Силовые общего назначения	1200; 2200; 3300 мкФ [±20]	600	–	[7,7; 12,0; 16,4]	–	0,12; 0,08; 0,044	–	T ₀ * = 6000 ч. Габариты $\varnothing 64 \times 96$ мм; $\varnothing 77 \times 115$ мм; $\varnothing 77 \times 155$ мм. Винтовые выводы. T = –25...+85 °C
Серия LQ [LLQ2A] (Nichcon)	Высоконадежные общего назначения	100–10000 мкФ [±20]	16–450	–	[0,9–5/0,12]	–	–	≤ 0,01 × CU + 3/2 мин	T ₀ * = 2000 ч (+85 °C). С заостренными выводами (Snap-in). Габариты $\varnothing(22-35) \times (25-50)$ мм радиальные выводы.
Серия EXR (Hitano)	Высоконадежные с малым импедансом	4,7–3300 мкФ [±20]	6,3–100	–	–	–	0,65* (100) [47 мкФ/100 В]–0,068* [470 мкФ/ 35 В]	≤ 0,01 × CV + 3 мкА/ 2 мин	T ₀ * = 5000 ч (+85 °C). Габариты $\varnothing 5-41$ мм, радиальные выводы. T = –40 (–25)...+105 °C
Серия ECX (Hitano)	Высоконадежные с малым импедансом	0,47–4700 мкФ [±20]	6,3–63	–	–	≤ 0,15 (6,3)–0,05 (63)	–	≤ 0,01 × CU _{max} = +3/ 2 мин	T ₀ * = 5000 ч (+85 °C). Габариты $\varnothing(5-41)$ мм, радиальные выводы. T = –40...+85 °C

50/60 Гц, а также для работы в сетях с напряжением до 12000 В для тягового электропривода. В частности, металлизированные полипропиленовые конденсаторы этой фирмы типа МКР (например, МКР 4,5 мкФ, 250 В) предназначены для компенсации реактивной мощности в сетях переменного тока. Параметры и особенности изделий МКР: $C_{ном} = 4,5\text{--}16$ мкФ; $U_{ном} = 800\text{--}230$ В; 50/60 Гц; конструкция — пластиковый внешний корпус с обратным предохранителем-прерывателем от внутреннего избыточного давления, функция самовосстановления при повреждении диэлектрика.

Конденсаторы серии E53 обладают очень низким последовательным сопротивлением (доли единиц миллиом) и высокой импульсной прочностью. Они рекомендуются для использования в демпфирующих схемах с ГТО-тиристорами, а также в низкоиндуктивных буферных цепях с высоким эффективным значением тока. За счет высокой удельной емкости имеют хорошие характеристики самовосстановления без потерь емкости. Благодаря низкой собственной индуктивности могут применяться и на средних частотах. Общие параметры конденсаторов серии E53XXXLI фирмы Electronicon [21]: $\gamma C = 10\%$; $tg\delta \leq 0,0002$; $L_C = 15$ нГн; $\tau_C = 5000$ с, $T_0^* = 100\ 000$ ч (!); $T = -25...+85$ °С. Другие параметры: $C_{ном} = 1,5\text{--}12$ мкФ; $U_{max-} = 280\text{--}2100$ Вэф, $U_{max+} = 550\text{--}5000$ В; $I_{max-} = 32\text{--}125$ А; $I_{max max-} = 1,35\text{--}12$ кАимп.

Дроссели

Дроссели бывают однофазные и трехфазные, низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ). НЧ выполняются на броневых или П-образных витых сердечниках из электротехнической тонкой (0,35 мм и менее) стали с зазором. Ранее они использовались в сглаживающих LC-фильтрах НЧ-выпрямителей трансформаторных источников питания, работавших на низкой частоте (50, 60, 400, 500, 1000 Гц). В качестве примера можно указать на широко применявшиеся отечественныемоточные изделия: трансформаторы и дроссели семейства «Габарит», предназначенные для работы на частотах 50 и 400–1000 Гц. Среди удачных разработок можно выделить серию малогабаритных унифицированных дросселей типа Д [22]. Унифицированные низкочастотные дроссели фильтров выпрямителей использовались в РЭА различного назначения, они выпускались в 26 типоразмерах. Всего было 233 типонаминала

дросселей броневой конструкции на магнитопроводах типов ШЛ и ШЛМ. Эти дроссели (Д1-Д179, Д201-Д274) были рассчитаны на частоты 50–5000 Гц, индуктивность 0,00015–40 Гн и ток подмагничивания 0,02–50 А. Масса дросселей, в зависимости от типонаминала и исполнения, составляла от 40 г (сердечник ШЛ 6×6,5) до 5650 г (сердечник ШЛ 32×40). В настоящее время НЧ-дроссели используются во входных цепях мощных импульсных источников питания для ограничения пусковых токов. В работе [7] показано, что в мощных (более 10 кВт) импульсных ИВЭ, питающихся от трехфазной сети переменного тока, для токоограничения рекомендуется включать сетевые дроссели. Здесь же приведены данные некоторых сильноточных однофазных и трехфазных сетевых (50–400 Гц) дросселей польской фирмы Elhand [23]. Автором статьи [7] в пакете MicroCap 7.0 была промоделирована схема входной части статического преобразователя с мощностью 12 кВт с сетевым трехфазным дросселем EDN3N 0,6/32 (0,6 мГн/32 А в каждой фазе). В сглаживающем LC-фильтре применены 2 дросселя типа ED1W (2,5 мГн/100 А). Фильтр имеет выходной конденсатор емкостью 1020 мкФ и рассчитан на подавление пульсаций 300 Гц. Расчетная величина пускового тока, протекающего через диоды трехфазного выпрямительного моста (160MT120KB фирмы IR), не превышает допустимого значения. Переходный процесс длится не более 10 мс, что не должно привести к срабатыванию установленного на входе автоматического выключателя на ток 25 А.

С другой стороны, с помощью указанного низкочастотного дросселя частично решается и проблема коррекции коэффициента мощности — КМ/Power Factor (PF), иначе называемого форм-фактором, влияющим, в конечном счете, на cosφ. За счет реактивного сопротивления дросселя, значительно увеличивающегося на высших гармониках, происходит уменьшение реактивной (емкостной) составляющей потребляемого из сети тока и, соответственно, снижение уровня высших гармоник. Это так называемая пассивная коррекция, когда НЧ-дроссель (без зазора) используется в цепи переменного тока после сетевого фильтра, а стандартный дроссель (с зазором) — после выпрямительного моста.

Развитие импульсных источников питания с преобразованием на высокой частоте

(десятки–сотни килогерц) потребовало разработки и применения ВЧ-дросселей. Для работы на частоте преобразования и ее гармониках ВЧ-дроссели чаще всего выполняются на тороидальных сердечниках из магнетодиэлектриков. Сначала применялись тороидальные сердечники из альсифера с низким значением магнитной проницаемости $\mu = 40\text{--}60$, а затем из Мо-пермаллоя (МП) с более высоким значением μ (140; 250). Также применяются Ш-образные броневые сердечники из ферритов с низкими значениями μ (порядка 400–1000) и с зазором. В импульсных ИВЭ с активным корректором коэффициента мощности ВЧ-дроссель используется в составе бустерного повышающего (до 375–450 В) импульсного стабилизатора. Такие ИВЭ с ККМ, как правило, используются при питании их от однофазной сети переменного тока мощностью до 3–5 кВт и могут обеспечить КМ порядка 0,8–0,99, то есть практически синусоидальную форму потребляемого из сети тока. И, наконец, применение высокой частоты преобразования в импульсных ИВЭ, инверторах, регулируемых электроприводах переменного тока большой мощности требует использования более высокочастотных (сотни килогерц – десятки мегогерц) дросселей для подавления кондуктивных помех. Такие, как правило, режкторные двухобмоточные ВЧ-дроссели, используются на вводах электропитания постоянного или переменного тока. На высоких частотах (более 3 МГц) эффективность дросселей повышается, если на их выводы (провода) надеть трубки или бусины (beads) из феррита с низкой магнитной проницаемостью, например марок M400НН, M600НН.

Основные параметры дросселей:

- номинальная индуктивность L ;
- отклонение (допуск) от номинального значения индуктивности $\pm\delta L$ (%);
- максимальный ток I_{max} (эффективное или среднее значение);
- максимальное значение допустимого напряжения U_{max} ;
- активное (омическое) сопротивление обмотки дросселя R_L ;
- рабочая $f_{раб}$ и резонансная $f_{рез}(f_0)$ частоты. Дополнительно для ВЧ-дросселей могут указываться приведенная паразитная емкость C_L обмотки и добротность Q_L . Для нормальной ра-

Таблица 5. Технические характеристики некоторых дросселей зарубежного производства

Тип (фирма)	Особенности	L , мГн [$\pm\delta R$, %]	I_{max} , А	R_L , Ом	$U_{max-} / V(U_{ном})$	$f(f_{рез})$, кГц [добротность Q]	Примечание
ED1N/ED1W (Elhand)	Однофазные НЧ-дроссели	*	*	–	750	$(50\text{--}400) \times 10^{-3}$	По стандарту IEC61558/IEC60589. Класс изоляции T40E
ED3N/ED3W (Elhand)	Трехфазные НЧ-дроссели	$(0,03; 0,05; 0,15; 0,5; 8,5) \times 10^3$	800; 400; 150; 70; 3,3	–	(400)	$(50\text{--}400) \times 10^{-3}$	По стандарту IEC61558/IEC60589. Класс изоляции E/F
Серия LGA0204	Малогабаритные ВЧ-дроссели	1–220 [10; 20]	0,27–0,035	0,8...20		$(150\text{--}5) \times 10^3$ [Q=35–40]	Аналог ДПМ, ДМ. $U_{зоп} = 500$ В; $R_{зоп} = 1000$ МОм
Серия RLB0712 (Bourns)	То же	10–560 [10]	1,1–0,15	0,01...1,8	600	$(16\text{--}2) \times 10^3$ [Q≥20]	Радиальные выводы. T = –20...+80 °С
Серия RLB0912 (Bourns)	ВЧ-дроссели	1–1000 [20; 10%]	6,0–0,2	0,01...4,3	600	$(88\text{--}2) \times 10^3$ [Q=30–55]	Радиальные выводы. T = –20...+80 °С
Серия B82111-B-C2X (EPCOS)	То же	22–220 [10]	3,0–0,5	–	500	–	–
B82504-W-A6 (EPCOS)	ВЧ-дроссель	140 [10]	16,0	0,24	500	–	Габариты $\varnothing 28 \times 78$ мм. T = –40...+125 °С
Серия B2720-K2xxx-N (EPCOS)	Двухобмоточные ВЧ-дроссели	$2 \times (1,1\text{--}12) \times 10^3$	2–0,6	–	250	–	–

Примечание: * — параметры L (мГн) и I_{max} (А) у однофазных низкочастотных дросселей фирмы Elhand устанавливаются по желанию заказчика из условия: $0,5 < (2f \times L \times 10^{-6}) < 100$, где f в Гц.

боты дросселей необходимо соблюдать $f_{\text{раб}} \ll f_{\text{рез}}$, чтобы исключить влияние собственного паразитного колебательного контура дросселя на его индуктивное сопротивление. Величины $f_{\text{рез}}$, C_L и Q_L определяются из выражений [24]:

$$\begin{aligned} f_{\text{рез}} &= 1/2\pi(LC_L)^{0,5}; \\ C_L &= [(2\pi f_{\text{рез}})^2 L]^{-1}; \\ Q_L &= 2\pi f_{\text{рез}}/R_L. \end{aligned}$$

В табл. 5 приведены основные характеристики некоторых серийных ВЧ-дросселей зарубежного производства.

В России у дистрибьюторов по заказам можно приобрести широко выпускавшиеся еще в СССР такие ВЧ-дроссели, как малогабаритные слаботочные типа ДМ, ДПМ, ДП-1, Д-13. Укажем для примера параметры ВЧ-дросселей типа Д-13 по АГО.475.007ТУ (разработаны под руководством к. т. н. Бландовой Е. С.). Дроссели изготавливались в двух конструктивных исполнениях (корпусном и бескорпусном), восьми типоразмеров и 22 типонаминов. Эти дроссели (Д13-1...Д13-22) были рассчитаны на диапазоны частот 0,05–200 кГц; индуктивности 0,005–5 мГн; тока подмагничивания 0,05–16 А. Паразитные параметры дросселей находятся в пределах: $C_L = 30\text{--}350$ пФ, $f_{\text{рез}} = 0,1\text{--}5,6$ МГц. Масса дросселей, в зависимости от типонаминала и исполнения, составляла от 3,5 г (сердечник МП140 К10×6×3) до 60 г (сердечник МП140 К27×15×5,2). Более сильноточные ВЧ-дроссели, разработанные одним из авторов для импульсного ИВЭ мощностью 1200 Вт (27 В/45 А), описаны в статье [25]. В частности, ВЧ-дроссели имеют такие характеристики:

- Накопительный дроссель L1 в ККМ-модуле: $L1 = 360$ мкГн; $I_{\text{max}} = 8,3$ А; $U_{\text{эфф}} = 200$ В при частоте 200 кГц; $R_L = 0,024$ Ом; $\Delta B = 0,06$ Тл; потери $P_{\Sigma} = 4$ Вт. Конструктивные данные: сердечник МП140 К44×28×10,3 мм.
- Дроссель L2 выходного выпрямителя в модуле преобразователя: L2-1 = L2-2 = 190 мкГн (параллельно); $I_{\text{max}} = 45$ А, каждый дроссель рассчитан на ток 23 А; $U_{\text{эфф}} = 35$ В при частоте 200 кГц; $R_L = 0,004$ Ом; $\Delta B = 0,03$ Тл; потери $P_{\Sigma} = 3,4$ Вт в каждом дросселе. Конструктивные данные: сердечник МП250 К44×28×10,3 мм.

Продолжение следует

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1 // Силавая электроника. 2009. № 5.
2. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // Силавая электроника. 2010. № 1.
3. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 3 // Силавая электроника. 2010. № 2.
4. Кокорева И. Отечественная силавая электроника. Фирмы-производители. // Электроника: НТБ. 2007. № 3.
5. Шурыгина М. Дискретные силовые приборы. Расширение применения и специализация. // Электроника: НТБ. 2007. № 3.
6. Эраносян С. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат. 1991.
7. Семенов Б. И волки сыты, и овцы целы. Комбинированный метод защиты преобразователей от пусковых сверхтоков и подавления высокочастотных гармоник. // Силавая электроника. 2008. № 3.
8. Четвертков И. И., Терехов В. М. Резисторы: справочник. М: Радио и связь. 1991.
9. Пассивные компоненты: Каталог группы компаний «Симметрон»-2007 // www.symmetrongroup.ru.
10. Бенкхов Ш. (пер.: Гнеушев О.) Безопасный заряд // Силавая электроника. 2008. № 3.
11. www.epcos.com
12. www.giricond.ru
13. www.philips.com
14. www.promelec.ru/catalog
15. Четвертков И. И., Дьяконов М. Н., Присяжков В. И. и др. Конденсаторы: справочник. М: Радио и связь. 1993.
16. www.planar.spb.ru
17. www.farnellinone.com
18. www.murata.com
19. www.vishay.com
20. www.wima.com
21. www.electronic.com/www.argussoft.ru
22. Сидоров И. Н., Мукошеев В. В., Христинин А. А. Малогабаритные трансформаторы и дроссели. Справочник. М.: Радио и связь. 1985.
23. www.elhand.com.pl
24. Векслер В., Недочетов Г., Пилинский В. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Киев: Техника. 1990.
25. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силавая электроника. 2006. № 2.