

Продолжение. Начало в № 4 '2010

Электронная компонентная база силовых устройств

Часть 4.3

Продолжено рассмотрение применяемых в настоящее время пассивных компонентов для силовых устройств, в том числе контакторов, пускателей, а также фильтров сетевых помех. Обзор дается для компонентов как отечественного, так и зарубежного производства.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

В работах [1–5] дан обзор и приведены характеристики активных силовых полупроводниковых, а также пассивных компонентов для широко распространенных классов современных силовых устройств (СУ). При этом в обзоре подчеркивается, что номенклатура пассивных компонентов для СУ очень велика, что обусловлено широким диапазоном рядообразующих параметров. Для иллюстрации этой тематики авторы ограничиваются рассмотрением отличительных особенностей и основных характеристик только некоторых из пассивных компонентов — контакторов и автоматических пускателей, а также фильтров сетевых помех.

Электромагнитные контакторы и пускатели

Электромагнитные контакторы — это электрические аппараты дистанционного действия, в которых замыкание или размыкание контактов производится чаще всего с помощью электромагнитного привода. Контактторы и пускатели являются одними из наиболее широко используемых электрических аппаратов управления. Так, общий объем выпуска этих устройств с номинальными токами 10–160 А на предприятиях бывшего СССР составил в 1991 г. около 18 млн. шт., а в 2001 г. — чуть менее 2,5 млн. Учитывая большой срок службы контакторов и пускателей, можно с уверенностью говорить, что в России в эксплуатации их находится несколько десятков миллионов штук. Наиболее широко применяются одно- и двухполюсные контакторы постоянного тока и трехполюсные переменного тока. Из-за частых коммутаций (число циклов включения/выключения изменяется от 30 до 3600 в час) к контакторам предъявляются повышенные требования по механической и электрической износостойкости. Авторы осознают, что, конечно, контакторы и пускатели — это тема для отдельной и обширной статьи. Поэтому в дальнейшем будут вкратце изложены только термины и определения, основные положения, характеристики и особенности, а также приведены некоторые примеры по отечественным и зарубежным аппаратам.

Контакторы как постоянного, так и переменного тока содержат: электромагнитную систему; кон-

тактную систему, состоящую из подвижных и неподвижных контактов; дугогасительную систему; систему блок-контактов. Последнюю составляют вспомогательные контакты, переключающие цепи сигнализации и управления при работе контакторов. В отличие от автоматических выключателей, контакторы могут коммутировать только номинальные токи, они не предназначены для отключения токов короткого замыкания.

Главные контакты осуществляют замыкание и размыкание силовой цепи и должны быть рассчитаны на длительное проведение номинального тока, а также на осуществление большого числа включений/отключений при максимально допускаемой их частоте. Нормальное положение контактов — это когда втягивающая катушка контактора не обтекает током, и освобождены все имеющиеся механические защелки. Дугогасительные камеры контакторов постоянного тока построены на принципе гашения электрической дуги при размыкании главных контактов поперечным магнитным полем в камерах с продольными щелями. Магнитное поле в подавляющем большинстве конструкций возбуждается последовательно включенной с контактами дугогасительной катушкой. Способы гашения дуги и конструкции дугогасительных систем определяются родом тока главной цепи и режимом работы контактора.

Электромагнитная система обеспечивает дистанционное управление контактором и состоит из сердечника, якоря, катушки и крепежных деталей. Ее конструкция определяется родом тока и цепи управления контактора и его кинематической схемой. Электромагнитная система контактора может рассчитываться на включение якоря и удержание его в замкнутом положении или только на включение якоря. Удержание же его в замкнутом положении в этом случае осуществляется защелкой. Отключение контактора происходит после обесточивания катушки под действием отключающей пружины или собственного веса подвижной системы (чаще пружины).

Вспомогательные контакты производят переключения в цепях управления контактора, а также в цепях блокировки и сигнализации. Они рассчитаны

на длительное протекание тока не более 20 А и отключение тока не более 5 А. Контакты выполняются как замыкающие, так и размыкающие, в подавляющем большинстве случаев — мостикового типа.

Управление контактором осуществляется посредством вспомогательной цепи оперативного тока, проходящего по катушкам контактора. При этом величина оперативного тока, как правило, значительно ниже величины рабочего тока в коммутируемых цепях. Контактор не имеет механических средств для удержания контактов во включенном положении, поэтому при отсутствии управляющего напряжения на катушке он размыкает свои контакты. Как правило, контакторы применяются для коммутации электрических цепей при напряжении до 660 В и токах до 630 А. Основные области их применения: управление мощными электродвигателями (например, на тяговом подвижном составе), коммутация цепей компенсации реактивной мощности, коммутация больших постоянных токов, подключение к сети переменного тока мощных источников питания.

Термины и определения, классификация и технические требования, а также другие необходимые сведения про контакторы приведены в ГОСТ Р 50030.4.1-2002 (МЭК 60947-4-1-2000) [6], ГОСТ Р 51731-2001 (МЭК 61095-92) [7], ГОСТ 11206-77 (2002) [8], ГОСТ 14312-79 [9].

Общепромышленные контакторы, как принято в России, классифицируются:

- по роду тока главной цепи и цепи управления (включающей катушки) — постоянного, переменного, постоянного и переменного тока;
- по числу главных полюсов — от 1 до 5;
- по номинальному току главной цепи — 1,5–4800 А;
- по номинальному напряжению главной цепи — 27–2000 В постоянного тока; 110–1600 В переменного тока частотой 50, 60, 500, 1000, 2400, 8000, 10 000 Гц;
- по номинальному напряжению включающей катушки — 12–440 В постоянного тока; 12–660 В переменного тока частотой 50 Гц; 24–660 В переменного тока частотой 60 Гц;
- по наличию вспомогательных контактов — с контактами и без них.

Контакторы также различаются по роду присоединения проводников главной цепи и цепи управления, способу монтажа, виду присоединения внешних проводников и т. п. Указанные признаки находят отражение в типе, который присваивается предприятием-изготовителем.

Нормальная работа контакторов допускается:

- при напряжении на зажимах главной цепи до 1,1 и цепи управления от 0,85 до 1,1 номинального напряжения соответствующих цепей;
- при снижении напряжения переменного тока до 0,7 от номинального; включающая катушка должна удерживать якорь электромагнита контактора в полностью притянутом положении и при снятии напряжения не удерживать его.

Выпускаемые отечественной промышленностью серии ЭМ-контакторов рассчитаны на применение в разных климатических поясах, при различных условиях, с механическими воздействиями и взрывоопасностью окружающей среды. Эти контакторы, как правило, не имеют специальной защиты от прикосновений и внешних воздействий.

Контакторы переменного тока выполняются с дугогасительными камерами с деионной решеткой. При возникновении дуга движется на решетку, разбивается на ряд мелких дуг и, в момент перехода тока через ноль, гаснет. Электрические схемы контакторов в большинстве случаев имеют стандартный вид и отличаются лишь количеством и видом контактов и катушек.

Важными параметрами контактора являются номинальные рабочие ток и напряжения. Номинальный ток определяется условиями нагрева главной цепи при отсутствии включения или отключения устройства. При этом контактор способен выдержать этот ток при замкнутых главных контактах в течение 8 ч, а превышение температуры различных его частей не должно быть больше допустимой величины. При повторно-кратковременном режиме работы аппарата используется понятие допустимого эквивалентного тока длительного режима.

Напряжение главной цепи контактора — это наибольшее номинальное напряжение, для работы при котором он предназначен.

Контакторы выбираются по следующим основным техническим параметрам:

- назначение и область применения;
- категория применения;
- величина механической и коммутационной износостойкости;
- число и исполнение главных и вспомогательных контактов;
- род тока и величины номинального напряжения и тока главной цепи;
- номинальное напряжение и потребляемая мощность включающих катушек;
- режим работы;
- климатическое исполнение и категория размещения.

Контакторы постоянного тока предназначены для коммутации цепей постоянного тока и, как правило, приводятся в действие соответствующим электромагнитом. Контакторы переменного тока предназначены для коммутации цепей переменного тока. Электромагниты этих цепей могут быть как переменного, так и постоянного тока. Контакторы постоянного тока выпускаются, в основном, на напряжение 22 и 440 В, токи до 630 А, однополюсные и двухполюсные. В настоящее время их применение и, соответственно, новые разработки сокращаются. Контакторы серии КПД 100Е предназначены для коммутирования главных цепей и цепей управления электроприводом постоянного тока напряжением до 220 В и выпускаются на номинальные токи 25–250 А. Контакторы серии КПВ 600 [10] предназначены для коммутации главных цепей электроприводов постоянного тока и имеют два исполнения:

с одним замыкающим главным контактом (КПВ 600) и с одним размыкающим главным контактом (КПВ 620). Управление контакторами осуществляется от сети постоянного тока. Они выпускаются на номинальные токи 100–630 А. Контактор на ток 100 А имеет массу 5,5 кг, на 630 А — 30 кг.

Контакторы переменного тока — КТ6000, КТ7000 [10]. Обозначения: КТ (КТП) — X1 X2 X3 X4 C X5, где: X1 — номер серии (60, 70); X2 — величина контактора (0–6); X3 — число полюсов (2–5). X4 — дополнительное значение специфических особенностей серии: Б — модернизированные контакты; А — повышенная коммутационная способность при напряжении 660 В; С — контакты с металлокерамическими накладками на основе серебра. Отсутствие буквы означает, что контакты медные. X5 — климатическое исполнение: У3, УХЛ, Т3.

Контакторы переменного тока строятся, как правило, трехполюсными с замыкающими главными контактами. Электромагнитные системы выполняются шихтованными, т. е. набранными из отдельных изолированных друг от друга пластин толщиной до 1 мм. Катушки низкоомные с малым числом витков. Основную часть сопротивления катушки составляет ее индуктивное сопротивление, которое зависит от величины зазора. Поэтому ток в катушке контактора переменного тока при разомкнутой системе в 5–10 раз превышает ток при замкнутой. Электромагнитная система контакторов переменного тока имеет короткозамкнутый виток на сердечнике для устранения гудения и вибрации. Широко известны также применяемые продолжительное время пускатели серии ПМА, ПМ, ПМЕ, ПАЕ [10, 11].

В отличие от контакторов постоянного тока, режим включения контакторов переменного тока является более тяжелым, чем режим отключения, что связано с пусковым током асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Кроме того, дребезг контактов при включении приводит в этих условиях к их значительному износу. Поэтому борьба с дребезгом при включении имеет первостепенное значение.

Для контакторов и пускателей определены следующие режимы работы (категории и области применения): АС-1 — электропечи сопротивления, неиндуктивная или малоиндуктивная нагрузка; АС-3 — прямой пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение вращающихся двигателей; АС-4 — пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей, торможение противовключением. Параметры износостойкости отечественных пускателей приведены в таблице 1.

Рассмотрим основные характеристики и особенности зарубежных контакторов на примере аппаратов фирмы OMRON [12, 13]. Компания Omron в 2004–2005 гг. разработала специальную серию контакторов G9E (иногда позиционируемых как очень мощные реле), которые способны переключать нагрузки с большим

Таблица 1. Показатели износостойкости отечественных пускателей

Тип пускателя	Номинальный ток, А	Коммутационная износостойкость в категории применения, млн. циклов ВО						Механическая износостойкость, млн. циклов ВО		
		АС-3			АС-4			Исполнение		
		Исполнение			Исполнение					
ПМЕ-211	25	3	1	0,3	0,4	0,1	0,08	16	16	5
ПМА-3000	40	2,5	1	0,3	0,35	0,16	0,08	16	16	8
ПМА-4000	63	2,5	1	0,3	0,35	0,16	0,08	10	5	5
ПМА-5000	100	2,5	1	0,3	0,25	0,125	0,06	10	5	5
ПМА-6000	160	2	0,75	0,3	0,2	0,1	0,05	10	5	5
ПМ12-016	16	2	1	0,3	0,4	0,2	0,1	20	20	10
ПМ12-025	25	2	1	0,3	0,4	0,2	0,1	20	20	10
ПМ12-040	40	2	1	0,3	0,32	0,2	0,1	16	16	8
ПМ12-063	63	2	1	0,3	0,32	0,16	0,08	10	10	5
ПМ12-080	80	2	1	0,3	0,25	0,125	0,06	10	10	5
ПМ12-100	100	2	1	0,3	0,25	0,125	0,06	10	10	5
ПМ12-160	160	1,5	0,75	0,3	0,2	0,1	0,05	10	10	5
ПМ12-250	250	1	0,4	0,2	0,2	0,1	0,05	10	10	5

напряжением и током. Контактторы выпускаются в газонаполненных корпусах, что позволяет уменьшить их размеры и уровень акустического шума при переключении. Модели имеют магнитный «обдув» контактов. Кроме того, катушка управления новых контакторов потребляет меньшую мощность, а срок службы контактов увеличен. G9EC и G9EB — новые модели в семействе контакторов постоянного тока G9E. Эта серия отличается высокой мощностью, а серия G9EB — особой компактностью. Основные характеристики и отличительные особенности устройств приведены в таблице 2.

Для борьбы с электрической дугой в контакторах предусматриваются специальные дугогасительные камеры с продольными щелями. Хотя они и улучшают гасящую способность, однако полного гашения электрической дуги в них не происходит. В отличие от обычных контакторов, в изделиях серии G9E не требуется большого объема дугогасительной камеры. Корпус G9EC имеет герметичную конструкцию, а цепи управления и коммутации размещены в отдельных отсеках и заполнены водородом. Кроме гашения дуги и повышения надежности контактной группы, герметичное исполнение позволяет, во-первых, ослабить силу возвратных пружин, что на 30% снижает требуемую мощность управляющей катушки, а во-вторых, на 50% снижает уровень акустического шума. Дополнительное преимущество герметичной конструкции – возможность работы при не-

благоприятных факторах окружающей среды (влажность, вредные примеси). В контакторах серий G9EA и G9EC магниты помещаются с обеих сторон камеры контактов, поэтому дуга расширяется магнитным полем и быстро гаснет. Все изделия серий G9E соответствуют требованиям стандарта UL 508 UL/CSA «Промышленная аппаратура управления».

Фирма ABB [14] выпускает широкую номенклатуру устройств, в том числе мощные, сильноточные и высоковольтные контакторы серии V-contact, предназначенные для работы с переменным током. Как правило, они используются для управления потребителями, которым требуется повышенное количество операций в час.

Контакторы состоят из штампованного пластмассового моноблока, содержащего в себе вакуумный прерыватель, подвижного узла, управляющего электромагнита, универсального блока питания и вспомогательных принадлежностей. Моноблок представляет собой опору для установки держателя предохранителей. Замыкание главных контактов обеспечивается управляющим электромагнитом, а размыкание происходит благодаря усилию противодействующей пружины. Конструкция является компактной и прочной, обеспечивает очень высокую электрическую и механическую долговечность, даже при отсутствии обслуживания. Главные контакты работают внутри вакуумных прерывателей (уровень разрежения очень высокий — порядка 13×10^{-5} Па). В момент размыкания в каждом

прерывателе происходит быстрое отделение друг от друга фиксированного и подвижного контакта. Перегрев контактов, возникающий в момент размыкания, вызывает образование металлических паров, благодаря которым электрическая дуга поддерживается вплоть до первого перехода к нулевому току. Охлаждение металлических паров позволяет при переходе к нулевому току восстановить высокую диэлектрическую прочность, способную выдержать высокие значения восстанавливающегося напряжения. В исполнении для управления двигателями значение тока прерывания меньше 0,5 А с чрезвычайно небольшими избыточными напряжениями.

Изделия серии V-contact являются взаимозаменяемыми со съемными контакторами серии VRC и обеспечивают те же характеристики. Контактторы V-contact серийно оборудуются электрическим удерживанием и предназначены для номинальных напряжений 7,2 кВ (V7) и 12 кВ (V12). Номинальный рабочий ток — до 400 А, кратковременно допустимый ток — 6 кА (1 с) и 2,5 кА (30 с). Напряжение электроизоляции — 20 кВ (50 Гц) и 60 кВ (в импульсе). Электрическая долговечность контакторов V-contact в категории АС3 составляет 100 000 операций (замыкания и размыкания) при отключаемом токе 400 А, токе замыкания 2,4 кА и $\cos \phi = 0,35$.

Контакторы поставляются в следующих версиях: фиксированная (по заказу с держателем предохранителей); фиксированная однополюсная (для заземления центра «звезды» транс-

Таблица 2. Основные характеристики контакторов фирмы OMRON

Тип	Отличительные особенности	Контактная группа				Катушка		Примечание
		$P_{к\max}$, кВт	$U_{к\max}$, В	$I_{к\max}$, А	Тип	$U_{ор}$, В	$R_{ор}$, Ом	
G9EB-1-B	Самая компактная модель в серии	6,25	250	25,0	SPST-NO (вид 1А). Контакты неполярные	-	-	T — -40...+70 С. Габариты — 25×60×58 мм
G9EA-1	Стандартная модель	12,0	400; 120	60,0; 100	SPST-NO (вид 1А). Контакты полярные	-	-	$N_{мех} = 2 \times 10^5$ срабатываний. $U_{изол\ к-с} = 2500$ В эф. T — -40...+70 °С. Габариты — 36×73×67,2 мм
G9EA-1-CA	Низкое контактное сопротивление	12,0	400	30,0	То же	-	-	Габариты — 36×73×67,2 мм
G9EC-1								
G9EC-1-12VDC	Наиболее мощный и сильноточный	80,0*	400	200,0	То же	12,0	938	$N_{мех} = 2 \times 10^5$ срабатываний. $U_{изол\ к-с} = 2500$ В эф. T — -40...+50 °С. Габариты — 44×98×86,7 мм
G9EC-1-24VDC						24,0	470	
G9EC-1-48VDC						48,0	234	
G9EC-1-60VDC						60,0	188	
G9EC-1-100VDC						100,0	113	

форматоров, без держателя предохранителей); съемная для корпуса СВЕ и ячейки PowerCube и др. Держатель предохранителей серийно поставляется для съемных контакторов, по заказу — для фиксированного контактора. Как правило, он предназначен для установки предохранителей с размерами, ударником среднего типа и электрическими характеристиками по норме CENELEC EN 60282-1 (94). Контактторы V7 могут использоваться с предохранителями 6–450 А (до 315 А для защиты двигателей и до 450 А — для защиты батарей конденсаторов), V12 — с предохранителями 6–200 А.

Держатели оборудованы устройством автоматического размыкания в случае плавления даже всего лишь одного предохранителя. Это же устройство не допускает замыкание контактора в случае отсутствия даже одного предохранителя.

Сетевые фильтры электромагнитных помех

Силовые устройства являются источником (генератором) электромагнитных помех (в дальнейшем — помехи) значительного уровня («помехоземиссия»). Регулярные помехи возникают при работе СУ с импульсным регулированием напряжения, тока или мощности (например, тиристорные регуляторы). Аналогичная картина также в СУ, работающих с преобразованием напряжения питания на повышенной частоте (десятки и сотни кГц). К последним относятся импульсные источники питания (AC/DC- и DC/DC-преобразователи), электроприводы переменного тока с преобразованием частоты. Источниками нерегулярных (случайных) помех являются механизмы перемещения, кондиционеры, сварочные агрегаты, станки и другое оборудование во время переходных процессов (пуск, торможение, останов) и в режиме повторно-кратковременной работы [15–17]. По характеру проявления помехи разделяются на: а) кондуктивные, т. е. распространяющиеся по проводам; б) помехи излучения (в пространстве). Кондуктивные помехи, распространяющиеся по линии питания в одном направлении относительно «земли», называются несимметричными, или помехами общего вида (common mode interference). Кондуктивные помехи, распространяющиеся по линии аналогично переменному току, называются симметричными, или дифференциальными (differential mode interference). Несимметричные помехи преобладают в частотном диапазоне около 1 МГц и более [16]. Они имеют место в большинстве случаев, поскольку практически все СУ так или иначе заземляются. Такие помехи наиболее трудны для подавления, поскольку их интенсивность и частотный спектр зависят от схемно-элементной и конструктивной реализации силовых объектов и от способов их заземления. Симметричные помехи проявляются в диапазоне до сотен кГц. По виду помехи можно разделить на импульсные перенапряжения и высокочастотные помехи. Действующие в сетях переменного тока

импульсные перенапряжения могут иметь амплитуду до 2 кВ (иногда до 4 кВ) и длительность от десятков наносекунд до сотен микросекунд. У ВЧ-помех амплитуда достигает 50–100 В (реже до 500 В), а частотный диапазон составляет единицы килогерц–десятки мегагерц. В основном для силовых устройств принято нормировать помехи в радиочастотном диапазоне 0,15–10(30) МГц [15, 16].

Подавление (ослабление) кондуктивных помех производится за счет применения подавителей и ВЧ-фильтров различного типа. В статье мы будем рассматривать только сетевые фильтры электромагнитных помех, поскольку в принципе большая часть СУ питается от сети переменного тока — однофазной или трехфазной. Подавление помех излучения осуществляется главным образом конструктивными мерами: оптимизация компоновки и разводки монтажа, экранирование (общее, поузловое, элементное), рациональное заземление. Импульсные перенапряжения, как правило, ослабляются с помощью таких подавителей помех, как разрядники или металлоокисные варисторы, о которых уже шла речь в статье [4]. Чаще всего варисторы размещаются на вводах сетевого питания отдельно от сетевого фильтра — для удобства проектирования и возможной замены при пробое. Схемотехнически сетевые однофазные фильтры помех реализуются по нескольким схемам [18, 19]. Но наибольшее применение нашли следующие основные конфигурации [20]:

- Однозвенный П-образный фильтр типа $C_{x1}-L-C_{x2}-2C_y$. В таком фильтре L — режекторный дроссель, обмотки которого включены последовательно в провода сети; C_{x1}, C_{x2} — дифференциальные конденсаторы, то есть конденсаторы для подавления дифференциальной помехи, включенные между фазными проводами (прямым и обратным); C_y — конденсаторы между проводами и корпусом фильтра («землей»).
- Двухзвенный П-образный фильтр типа $C_{x1}-L_1-C_{x2}-2C_{y(1)}-L_2-C_{x3}$. Здесь L_1, L_2 — режекторные дроссели первого и второго звеньев фильтра; C_{x1}, C_{x2}, C_{x3} — дифференциальные конденсаторы звеньев фильтра; C_y — конденсаторы фаз на корпус фильтра («землю»).

В частных вариантах этих конфигураций возможно отсутствие некоторых элементов по условиям применения, например, в первой конфигурации — конденсатора C_{x2} .

Однозвенный П-образный фильтр типа $C_{x1}-L-C_{x2}-2C_y$ применяется наиболее часто, поскольку является самым простым и имеет минимальное количество компонентов. Тем не менее он позволяет обеспечить высокую степень подавления ВЧ-помех порядка 30–80 дБ в диапазоне частот 0,15–10(30) МГц. Режекторный дроссель L, если нет покупного, рекомендуется выполнять на сердечнике с достаточно высокой магнитной проницаемостью ($\mu \leq 1000$), то есть на никель-цинковом феррите или Мо-пермаллое (отечественные МП140, МП250). Эта рекомендация связана с опасностью насыщения сердечника из-за возможной несинусоидальности сетевого на-

пряжения (четные гармоники) или из-за появления помех большой амплитуды и других факторов. Обмотки дросселя включаются последовательно в провода электросети, причем полярность обмоток такова, что для несимметричной помехи они имеют большое индуктивное сопротивление, поскольку включены согласно. Индуктивность каждой обмотки дросселя должна быть достаточно велика и лежит в пределах 0,5–40 мГн — в зависимости от величины сетевого тока. В то же время для симметричной (дифференциальной) помехи индуктивное сопротивление обмоток минимально, так как они включены встречно. Необходимые соображения по определению величины емкостей конденсаторов C_{x1}, C_{x2}, C_y рассматриваемого фильтра приведены в работе [20]. В частности, там указано, что для импульсных ИВЭ с мощностью 30...300...3000 Вт:

- $C_{x1} = 0,22 \dots 1,0 \dots 4,7$ (10) мкФ — на напряжение ~250 В эф (постоянное 630 В_н/1000 В_н);
- $C_{x2} = 0,1 \dots 0,47 \dots 2,2$ (4,7) мкФ — на напряжение ~250 В эф (постоянное 630 В_н/1000 В_н);
- $C_y = 470 \dots 2200 \dots 10000$ пФ — на рабочее напряжение 3000 В.

Конденсаторы помехоподавляющих фильтров должны иметь малый импеданс Z_C в широком диапазоне частот. В качестве C_{xi} в основном используются двухвыводные полиэтилентерефталатные или полипропиленовые конденсаторы: отечественные К73-17, К73-50, а также импортные MKS4 и их аналоги. Лучшие результаты дает применение трех- и четырехвыводных конденсаторов (например, отечественных К73-21). У таких конденсаторов, в отличие от двухвыводных, индуктивность выводов не входит в их импеданс, а играет роль индуктивности в дополнительном (внутреннем) ВЧ-фильтре LC-типа. Так, например, пленочный конденсатор типа К73-21г при емкости 1 мкФ и рабочем напряжении ~250 В эф (500 В_н) может эффективно работать в полосе частот 0,15–100 МГц.

В качестве несимметричных C_y используются высоковольтные керамические конденсаторы, в частности отечественные К15-5, импортные типа DEBxx фирмы Murata [21], ESP фирмы Hitano [22, 23]. Отличные результаты дает применение комбинированных конденсаторов, в которых C_x и $2C_y$ объединены, т. е. C_x+2C_y . Например, отечественные конденсаторы К73-43 [15, 24] различных модификаций содержат комбинацию (0,1; 0,22; 0,68) мкФ+2×(2200; 4700) пФ с рабочим напряжением ~250 В эф (C_x) и способны работать в частотном диапазоне 0,15–30 МГц.

При разработке СУ сетевые фильтры могут выполняться как на дискретных компонентах, так и применяться в виде готовых покупных изделий. Первый вариант чаще всего используется в импульсных ИВЭ малой и средней мощности (до 400–500 Вт). При этом можно добиться высокой плотности компоновки (высокой удельной мощности). В большинстве СУ большой мощности удобнее применять покупные фильтры, которые имеют

Таблица 3. Основные характеристики однофазных сетевых фильтров электромагнитных помех

Тип (фирма, страна)	Максимальный входной ток $I_{\text{вх}}$, А эф	Коэффициент подавления ВЧ-помех $K_{\text{п}}$, дБ (f, МГц)	Схема и параметры компонентов	Примечание
ФС1-1, ФС1-2, ФС1-3, ФС1-6 (ООО «Балтэлектронкомплект», Россия)	1,0; 2,0; 3,0; 6,0	40 (0,15)	C_x-L-2C_y	
ФС-16М (ГК «Полигон», Россия)	16,0	20 (0,1); 40/60 (1/3); 60/40 (10/30)	-	Подавление импульсных помех варисторным блоком до 8,5 кА. Габариты 54×90×65 мм. На DIN-рейку
ФПБМ-1, ФПБМ-2, ФПБМ-3 (Россия)	5,0; 10,0; 20,0	60–90 (0,01–1000)	$C_{x1}-L-C_{x2}-2C_y$ (модифицированная)	Габариты 240×75×55 мм
ФСМА (Россия)		30–60 (0,01–1000)		Габариты 104×94×52 мм
L2131xxx-серия [L2131C/L] (Belling Lee, Англия)	2,0; 6,0; 6,0 — медицинский А	17 (0,15); 55/70 (1–3); 55 (30); 40 (50)	$L-C_x-2C_y$; $L=0,7$ мГн; $C_x=0,015$ мкФ; $C_y=4,7$ нФ	Габариты 28,5×21×54,5 мм. Для встраивания в панель. $T=-25...+70$ °С
FN2070-серия (Schaffner, США)	1,0; 3,0; 6,0; 10,0; 12,0; 16,0	30 (0,15); 80/90 (1/3); 50 (30)	$C_x-L-C_x-2C_y$; $L=22$ мГн (1 А); 9,6 мГн (3 А); 2,8 мГн (16 А); $C_x=(0,33; 0,47; 1)$ мкФ; $C_y=2 \times 4,7$ нФ	Габариты 30,3–57,3×85–119×54–85 мм. $T=-25...+85$ °С
FN2310-серия (Schaffner, США)	3,0; 6,0; 10,0	30 (0,15); 55/60 (1/3); 45 (30)	$C_x-L1-L2-C_x-2C_y$; $L=36,9$ мГн (3 А); 9,6 мГн (6 А); 9,6 мГн (10 А); $L2=75$ мГн (10 А); $C_x=(0,4; 1,5; 1)$ мкФ; $C_y=2 \times (4; 10)$ нФ	$I_{\text{ут}}=0,69...1,73$ мА. Нароботка на отказ $T_0=1,7 \times 10^6$ ч. Габариты (40,3; 45,5)×(54,4; 57,5)×(85; 113,5) мм. $T=-25...+105$ °С
INF-серия (Roxburgh Electronics, Англия)	18,0; 25,0; 36,0; 50,0	48; 45; 40; 33(0,15)	$C_{x1}-L-C_{x2}-2C_y$; $L=(15; 8,5; 3,8; 2)$ мГн; $C_{x1}=2,2$ мкФ; $C_{x2}=0,22$ мкФ; $C_y=2 \times 2,2$ нФ	$I_{\text{ут}} \leq 3$ мА. $U_{\text{из}}=2500$ В эф. Габариты 77×116×174 мм. $T=-25...+85$ °С

нормированное подавление помех, обеспечивают выполнение требований по электробезопасности, а также снабжены экранирующим корпусом.

Основные параметры сетевых фильтров электромагнитных помех:

- коэффициент подавления помехи $K_{\text{п}} = 20 \lg (U_{\text{п. вх}}/U_{\text{п. вых}})$, где $U_{\text{п. вх}}$, $U_{\text{п. вых}}$ — амплитуды входного и выходного сигналов помехи;
- частотный диапазон помехи $\Delta f = f_{\text{н}}...f_{\text{в}}$;
- максимальное входное силовое (сетевое) напряжение переменного тока U_{1-} ;
- максимальный входной (сетевой) ток I_{1-} ;
- максимально допустимый ток утечки на корпус фильтра $I_{\text{ут-}}$ (по условиям электробезопасности);
- напряжение электроизоляции $U_{\text{изол-}}$.

Можно указать еще на допустимое падение напряжения на фильтре ΔU_{1-} , которое не должно превышать 1–2% (в зависимости от мощности). Заметим, что максимальное допустимое значение тока утечки фильтра $I_{\text{ут-}}$ не должно превышать доли-единицы миллиампер: 4,5 мА для промышленного оборудования и 0,3–1 мА — для медицинской аппаратуры.

В статье [18] приведены общие рекомендации по выбору фильтров ЭМП, а также основные параметры некоторых сетевых однофазных фильтров помех отечественного и зарубежного производства. В России сетевые фильтры помех выпускают и поставляют фирмы: ООО «Балтэлектронкомплект» (СПб) [25], ОАО «НИИ «Гириконд» [26], группа компаний «Полигон» [27] и др.

В таблице 3 приведены основные характеристики некоторых однофазных сетевых фильтров помех отечественного и зарубежного производства.

К сожалению, приходится отметить, что, в отличие от зарубежных, по некоторым отечественным фильтрам можно получить лишь неполную информацию, поскольку отсутствуют надлежащим образом оформленные справочные данные (data sheets или .pdf).

Отечественные фильтры типа ФПБМ-1/2/3, ФСМА [18] имеют большой коэффициент подавления помех — порядка 60–90 дБ в диапазоне частот 0,01–1000 МГц. Они выполнены в герметичных металлических корпусах. Соединение входа-выхода фильтра с электросетью и нагрузкой осуществляется с помощью проходных контактов, состоящих из вывода, запрессованного в изолирующую втулку. Фильтры залиты эпоксидным компаундом и рассчитаны на жесткие условия эксплуатации с гарантированным сроком не менее 5 лет со дня изготовления. В отличие от ранее разработанных (типы ФП, ФПВЧ, ФПС и др.), в ФПБМ-1/2/3 и ФСМА при синтезе их частотных характеристик были использованы паразитные параметры элементов и дроссели на составных магнитопроводах, что позволило значительно улучшить их массо-габаритные показатели. Кроме того, несмотря на то, что фильтры разработаны для однофазной двухпроводной сети, их можно использовать и в других сетях. Так, в этой же работе [18] приведены схемы включения фильтров типа ФПБМ-3 в трехфазную сеть как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. В первом случае входные зажимы «Фаза/Line» всех трех фильтров ФПБМ-3 подключаются к фазам А, В, С сети, зажимы «N» — к нейтрали трехфазной сети и зажимы «корпус/ground» — к «земле». Одноименные выходные зажимы соединяются аналогично, а общие выходные выводы подключаются к нагрузке. По техническим условиям разрешается использование этих фильтров как на переменном (220 В, 50 Гц), так и на постоянном (12–120 В) токе. Также возможна работа фильтров в параллельном режиме, что позволяет расширить диапазон токов до 100 А.

Зарубежные компании, предметно или наряду с другой электротехнической продукцией, выпускают ряд сетевых фильтров помех одно- и трехфазных [28]. К числу таких фирм относятся EPCOS [19], Belling Lee [29],

Schaffner [30], Roxburgh Electronics [31]. Из таблицы 3 следует, что указанные в ней фильтры фирм Belling Lee, Schaffner и Roxburgh имеют наибольшие значения коэффициента подавления $K_{\text{п}}$ порядка 50–90 дБ в частотном диапазоне 0,5–3(5) МГц — в зависимости от схемы фильтра.

Отметим, что очень широкую номенклатуру сетевых фильтров помех выпускает компания Schaffner, один из мировых лидеров в вопросах обеспечения ЭМС. Фирма была основана в 1962 г. немецким инженером Хансом Шеффнером (Hans Schaffner), одним из пионеров в области обеспечения ЭМС. В дальнейшем, с 1975 г., компания превратилась в международную Schaffner Group, зарегистрированную в США и открывшую свои представительства во Франции, Великобритании, Таиланде, Италии и других странах. Компания выпускает одно- и трехфазные фильтры различного исполнения, которые могут устанавливаться как на шасси, так и на DIN-рейку.

Приведем для иллюстрации основные технические данные фильтров помех серии FN256 фирмы Schaffner [30], предназначенных для использования в трехфазной сети с нейтралью. Они рассчитаны на работу при сетевом напряжении до 3×480 В/277 В в частотном диапазоне 0–400 Гц с токами 8–160 А (8,0; 16,0; 25,0; 36,0; 64,0; 80,0; 120,0; 160,0 А) в зависимости от типа. Фильтры выполнены по распространенной схеме трехфазных фильтров: $C_{x11}-L_1-C_{x21}$ — для каждой из фаз А, В, С и конденсаторы $C_{y1}-L_N-C_{y2}$ — между нейтралью («N'-вход» и «N''-выход») и «землей» («Gnd»). Здесь L_i (L_A, L_B, L_C, L_N) — обмотки режекторного дросселя L в фазах А, В, С и нейтрали N. Коэффициент подавления $K_{\text{п}}$ составляет в среднем 45 дБ (150 кГц)...70 дБ (1 МГц)...40 дБ (10 МГц).

Другие параметры: ток утечки $I_{\text{ут}}$ — от 3,4 до 6,8 мА; потери мощности на фильтре — от 2,7 Вт (для фильтра с током 8 А) и до 30,7 Вт (для фильтра с током 160 А). Габаритные размеры — (120–200)×(115–140)×(80–160) мм.

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1 // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 1.
3. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 3 // Силовая электроника. 2010. № 2.
4. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 4.1 // Силовая электроника. 2010. № 3.
5. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 4.2 // Силовая электроника. 2010. № 4.
6. ГОСТ Р 50030.4.1-2002 (МЭК 60947-4-1-2000) «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контактные и пускатели. Электромеханические контакторы и пускатели».
7. ГОСТ Р 51731-2001 (МЭК 61095-92) «Контакторы электромеханические бытового и аналогичного назначения».
8. ГОСТ 11206-77 (2002) «Контакторы электромагнитные низковольтные. Общие технические условия».
9. ГОСТ 14312-79. «Контакты электрические. Термины и определения».
10. www.reon-zp.ru
11. www.electropole.ru
12. www.omron.com
13. Кривандин С. Мощные контакторы Omron для энергетики, промышленности и транспорта // Электронные компоненты. 2007. № 11.
14. www.abb.com
15. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2006. № 4.
16. Векслер В., Недочетов Г., Пилинский В. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Киев: Техника. 1990.
17. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. Под ред. Кармашева В. С. М.: Норг. 2001.
18. Бландова Е. С. Рекомендации по выбору и применению помехоподавляющих изделий // Специальная техника. 2002. № 1.
19. www.epcos.com
20. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 2 // Силовая электроника. 2007. № 1.
21. www.murata.com
22. www.hitano.com
23. Каталог «Пассивные компоненты». Группа компаний «Симметрон». 2007. www.symmetrongroup.ru
24. Четвертков И. И., Дьяконов М. Н., Присняков В. И. и др. Конденсаторы: справочник. М: Радио и связь. 1993.
25. Каталог изделий ООО «Балтэлектрон-комплект». 2007. www.bec.spb.ru
26. www.giricond.ru
27. www.poligonspb.ru
28. www.farnellinone.com
29. www.belling.com
30. www.schaffner.com
31. www.roxburgh.com