

Использование конденсаторов и дросселей ELECTRONICON

для компенсации реактивной мощности

Использование компонентов для компенсации реактивной мощности — силовых конденсаторов и фильтрующих дросселей — один из наиболее простых и эффективных способов энергосбережения в промышленных и коммунально-бытовых распределительных сетях.

Алексей Юшков

yushkov_alexei@argussoft.ru

Безопасность для окружающей среды

Конденсаторы, произведенные компанией ELECTRONICON, не содержат ПХБ, растворители, а также любые другие ядовитые или запрещенные материалы. Эти конденсаторы не классифицируются как опасные товары согласно транзитным правилам. Конденсаторам присвоен класс WGK 0 (water risk category 0 — «нет угрозы загрязнения в случае утечки»). Нет опасности для здоровья в случае правильного применения. Все конденсаторы, произведенные после 1 января 2006 года, изготовлены с использованием технологии бессвинцовой пайки.

Безопасность конденсаторов

Рассмотрим основные особенности конденсаторов ELECTRONICON, обеспечивающие их безопасную эксплуатацию.

Защита от перенапряжений и коротких замыканий — самовосстанавливающийся диэлектрик

Во всех силовых конденсаторах используется самовосстанавливающийся диэлектрик. В момент короткого замыкания (электрического пробоя) на месте пробоя в течение нескольких микросекунд испаряется металлический слой и удаляется из центра пробоя (см. рис. 1). В результате образуется свободная от металла изолированная зона. Конденсатор остается полностью работоспособным во время пробоя и после него. Безопасность конденсаторов при напряжениях, лежащих в области допустимых, гарантирована.

В силовых конденсаторах также предусмотрена защита от прикосновения. Подключающий конструктивный элемент имеет степень защиты IP20 — это означает, что все токовыводящие части недоступны для прикосновения рукой.



Рис. 1. Самовосстанавливающийся диэлектрик

Как было сказано ранее, во всех силовых конденсаторах используется диэлектрик, способный самовосстанавливаться после пробоя. При работе на напряжениях, не превышающих допустимое тестовое и максимальное рабочее (см. табл.), конденсаторы защищены от перенапряжений, кроме того, они защищены от внешних коротких замыканий, если не превышает допустимое значение неповторяющегося тока перегрузки I_S .

Таблица. Допустимые перегрузки по напряжению

Напряжение	30% периода эксплуатации
$1,1 \times U_N$	30 мин/день
$1,2 \times U_N$	5 мин/день
$1,3 \times U_N$	1 мин/день
$1,5 \times U_N$	100 мс/день

Защита от перенагрузки и выход из строя в конце срока службы

При перенагрузке по напряжению или в конце срока работы в конденсаторе из-за большого количества самовосстанавливающихся пробоев может возникнуть избыточное давление. Чтобы корпус не взорвался, в конденсаторах предусмотрен предохранитель-прерыватель избыточного давления. Им является один из конденсаторных проводов, с технологически подготовленным местом надлома. При возникновении

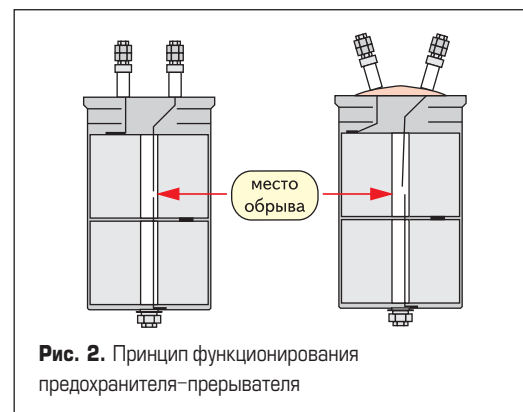


Рис. 2. Принцип функционирования предохранителя-прерывателя

избыточного давления длина корпуса конденсатора в результате расширения зиговки в корпусе или возникновения выпуклости в крышке удлинится, и провод в месте надлома разрывается. Токовая связь в конденсаторе прерывается (рис. 2).

Диэлектрик

Конденсаторы по МКР-технологии изготавливаются из полипропиленового диэлектрика с малыми собственными потерями. Тонкая самовосстанавливающаяся смесь из цинка и алюминия под вакуумом напыляется на одну из сторон полипропиленовой пленки. Обе торцевые стороны секции металлизируются методом напыления и гарантируют высокую токовую нагрузку и низкоиндуктивный контакт между выводами и секцией (рис. 3). Многолетний опыт компании ELECTRONICON, а также проведенные многочисленные исследования по улучшению данной технологии позволили добиться превосходного самовосстановления диэлектрика и увеличения продолжительности функционирования конденсаторов.

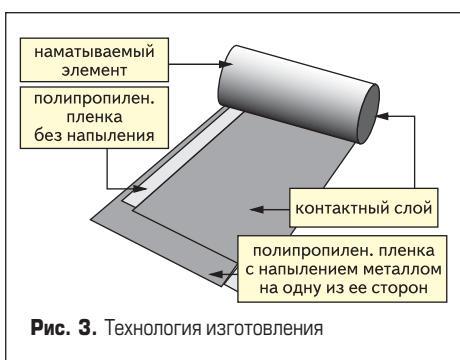


Рис. 3. Технология изготовления

Наполнители

Применение пропиточных материалов и наполнителей необходимо для защиты конденсаторных электродов от кислот, влажности и других опасных влияний внешней среды. Без такой изоляции произойдет коррозия металлических обкладок и возрастание числа отдельных частичных разрядов. Вследствие этого может произойти возрастание электрических потерь и сокращение срока службы. Сложная процедура вакуумной сушки начинается сразу после помещения элементов конденсатора в алюминиевый корпус. После сушки корпус конденсатора заполняется экологически безопасным маслом либо ПУР-смолой. Таким образом создается защита от влияний окружающей среды, увеличивается продолжительность жизни и обеспечивается стабильность емкости конденсаторов.

Самовосстанавливающиеся конденсаторы среднего напряжения серии MSD, выполненные по сухой технологии

Конденсаторы компании ELECTRONICON, в отличие от традиционных конденсаторов среднего напряжения, изготавливаемых по технологии all-film и наполненных воспламеняющейся жидкостью, используют твердый наполнитель. Благодаря специально разработанной технологии достигается высококачественная изоляция между активной частью конденсатора и его корпусом. Эта изоляция является важнейшим фактором для надежного функционирования контроля внутреннего давле-



Рис. 4. Внешний вид MSD-конденсаторов

ния в конденсаторе. Самовосстанавливающиеся конденсаторы серии MSD удовлетворяют всем требованиям действующего в настоящее время стандарта для конденсаторов среднего напряжения — IEC 871 — по надежности и электрическим параметрам. При этом нельзя забывать, что у таких конденсаторов, как и у всех самовосстанавливающихся, в случае их отказа не происходит короткого замыкания, и использование плавких предохранителей с целью отключения от сети невозможно. Данная задача решается с помощью встроенного автоматического выключателя, срабатывающего при повышении давления, что соответствует нормам для конденсаторов силовой электроники и для индуктивного нагрева (VDE-EN 61071 и VDE-EN 61010).

Общие технические данные:

- Внутренняя схема: Y.
- Диапазон рабочих напряжений: до 12 кВ.
- Диапазон мощности: до 400 кВАр.
- Испытательное напряжение: $2,15 \times U_N$.
- Диапазон I_N : до 100 А/фаза.
- Пусковой ток: макс. $100 \times I_N$.
- Разрядное сопротивление: встроено ($< 75 \text{ В} / < 10 \text{ мин}$).
- Мощность потерь: $< 0,25 \text{ В} / \text{кВАр}$.
- Температурный класс: 40 °C/ В, С, D (см. таблицу данных).
- Выключатель повышенного давления, размыкающий контакт: 5 А при 250 В.

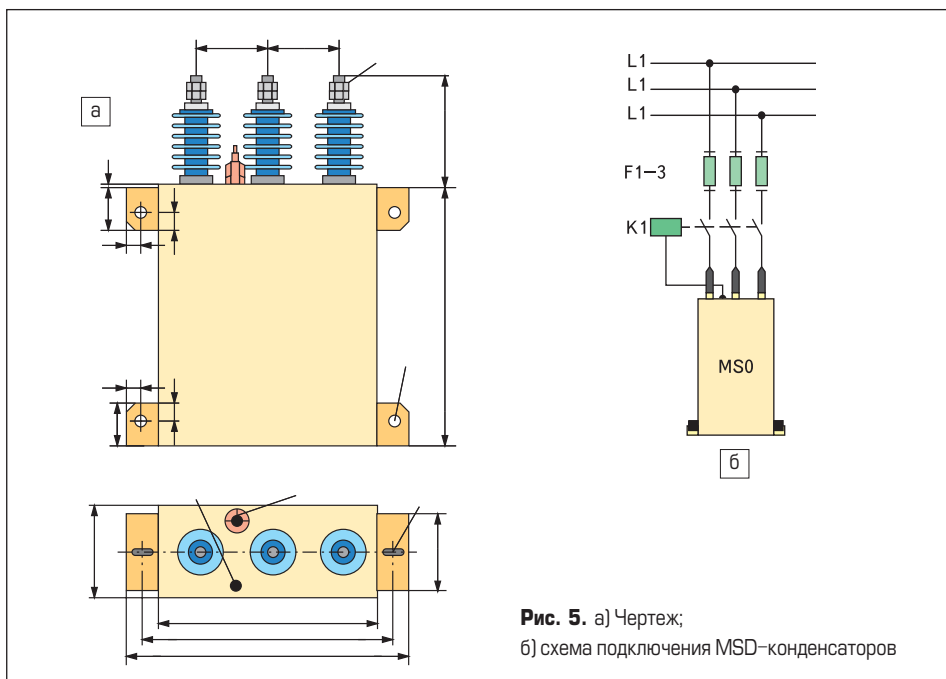


Рис. 5. а) Чертеж; б) схема подключения MSD-конденсаторов

- Монтаж: внутренний.
- Высота над уровнем моря, стандарт: 2000 м.
- Путь тока утечки: 290 мм.
- Допустимое рабочее напряжение:
 - 24 ч — U_N ;
 - 12 ч/д — $1,1 \times U_N$;
 - 30 мин/д — $1,15 \times U_N$;
 - 5 мин (200х) — $1,2 \times U_N$;
 - 1 мин (200х) — $1,3 \times U_N$;
 - максимальный пиковый номинал — $3 \times U_N$.
- Срок службы более 100 000 ч.
- Преимущества MSD-технологии:
 - В случае отказа не происходит короткое замыкание благодаря высокоомным характеристикам самовосстанавливающегося диэлектрика. Не требуются специальные токовые предохранители короткого замыкания.
 - Незначительные расходы на схему контроля. Достаточно регулировать функцию отключения контактора с помощью размыкающего контакта, встроенного в конденсатор выключателя и срабатывающего при превышении давления.
 - Каждый конденсатор контролируется отдельно. Любое количество отдельных конденсаторов может быть объединено в цепи защиты.
 - Риск возникновения асимметрии практически исключен. Отпадает необходимость контроля нулевой точки, и, таким образом, снижаются монтажные затраты.
 - Благодаря технологии сухого изготовления нет необходимости в защитном маслосборнике: нет риска потери масла, которое могло бы принести вред окружающей среде.
 - Надежность при использовании в установках компенсации реактивной мощности с дросселями (согласованными и несогласованными), а также в двойных фильтрах, благодаря:
 - высокой стабильности по времени;
 - значительно меньшей температурной чувствительности емкости (около $2,5 \times 10^{-4}$, что на 60% лучше, чем у диэлектрика, изготовленного по технологии all-film);
 - очень узкому допуску по емкости (до $\pm 2,5\%$).

О влиянии работы электронного оборудования на силовые электрические сети

Материальной основой современного информационного общества, безусловно, является компьютер. За последние 10 лет он не только изменил образ жизни и работы миллиардов людей, но и сформировал новые требования к инфраструктуре, обеспечивающей его функционирование.

Центр электромагнитной безопасности (ЦЭБ) в последние несколько лет в ходе выполнения ряда работ исследовал состояние систем электроснабжения 0,4 кВ в крупнейших зданиях Москвы. Рассматривались постройки, содержащие компьютерные сети с численностью от 20 до тысячи компьютеров и более. Обработка собственных измерений, а также анализ опыта зарубежных коллег из IEEE привели специалистов ЦЭБ к выводу, что Россия столкнулась с новой серьезнейшей проблемой. Суть ее состоит в том, что сети электроснабжения 0,4 кВ в зданиях, оснащенных компьютерной техникой, буквально «заражены» высшими по отношению к промышленной основной частоте (50 Гц) гармониками.

В недалеком прошлом большая часть электрической энергии потреблялась линейными нагрузками — лампами накаливания, нагревательными элементами, нагрузкой от двигателей и другими подобными электропотребителями. С конца 90-х годов резко возросла доля нелинейных электропотребителей, таких как персональные компьютеры и файл-серверы, мониторы, лазерные принтеры, блоки бесперебойного питания, а также другое офисное оборудование — копировальные аппараты и факсы; газоразрядные лампы и др. Дело в том, что для питания перечисленного оборудования используются встроенные импульсные источники питания, представляющие собой нелинейную нагрузку, сопротивление которой постоянно изменяется.

Ток, потребляемый этими источниками, имеет ярко выраженный импульсный характер. Это объясняется схемными особенностями импульсных источников питания — наличием сетевого выпрямителя (диодного моста) и сглаживающего емкостного фильтра. Другими словами, ток, потребляемый такими устройствами, в отличие от синусоидального тока линейных нагрузок, представляет собой периодический несинусоидальный сигнал.

Отрицательное воздействие ПК на сеть

В случаях, когда мощность нелинейных электропотребителей не превышает 10–15% от общего потребления мощности, каких-либо особенностей в эксплуатации системы электроснабжения, как правило, не возникает. При превышении указанного предела следует ожидать появления различных проблем в эксплуатации и последствий, причины которых не очевидны. В зданиях, где доля нелинейной нагрузки превышает 25%, отдельные проблемы могут проявиться сразу же.

Наличие высших гармонических составляющих в токах нелинейных электропотребителей приводит к следующим негативным, а в ряде случаев, и к катастрофическим последствиям.

Возможен перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами третьей гармоники, когда токи в этих проводниках значительно превосходят токи фазных проводников, а защита от токовых перегрузок в цепях нулевых проводников не предусмотрена (п. 1.3.10 ПУЭ). Необходимо также отметить ускоренное старение изоляции при повышении рабочей температуры токонесущих проводников.

При линейной, даже самой мощной, нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет меньше, чем максимальный ток в фазных проводниках. Совсем иная ситуация складывается при наличии нелинейных нагрузок — в этом случае ток в нулевом рабочем проводнике может превышать ток в фазе более чем в 1,5 раза.

Искажение синусоидальности питающего напряжения

Из-за характера тока, потребляемого импульсной нагрузкой, возникает деформация синусоиды напряжения, действующей на входе нагрузки. Синусоида напряжения становится «плоской» по форме, так как в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети. Рассмотрим последствия воздействия «плоской» синусоиды на импульсный источник питания:

- снижение уровня выпрямленного напряжения;
- увеличение тепловыделения в элементах импульсного источника питания;
- снижение устойчивости к кратковременным провалам напряжения.

Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в трансформаторах. Это может привести к значительным потерям энергии и стать причиной выхода из строя трансформаторов вследствие перегрева.

Протекание по обмоткам трансформатора несинусоидальных токов, в силу поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора и, как следствие, к дополнительному нагреву и уменьшению срока его службы.

- В условиях несинусоидальности тока ухудшаются условия работы батарей конденсаторов. Батареи конденсаторов предназначены для компенсации реактивной мощности нагрузки, то есть для повышения коэффициента мощности электроустановки здания. Однако в условиях несинусоидальности тока конденсаторы одновременно являются элементами, поглощающими гармоники со всей сети. Они изменяют нормальный путь гармоник тока от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя.
- Сокращение срока службы электрооборудования возникает из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции. При рабочих температурах в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к постепенному

изменению их изоляционных и механических свойств. С ростом температуры эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования. В конденсаторах потери энергии пропорциональны частоте, поэтому несинусоидальный ток приводит к дополнительному нагреву конденсаторов.

- Необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей в результате дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств, обусловленного протеканием несинусоидальных токов и, следовательно, действием поверхностного эффекта и эффекта близости.
- Ускоренное старение изоляции проводов и кабелей. Старение изоляции проводников и кабелей обусловлено протеканием несинусоидального тока, приводящего к повышенному нагреву наружной поверхности жил кабеля вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости.
- Помехи в сетях телекоммуникаций могут возникать там, где силовые кабели и кабели телекоммуникаций расположены в относительной близости. Вследствие протекания в силовых кабелях высокочастотных гармоник тока, в кабелях телекоммуникаций могут наводиться помехи. Магнитные поля высших гармоник прямой и обратной последовательности частично компенсируют друг друга, поэтому наибольшую роль в проблеме влияния на телекоммуникации играют гармоники, кратные трем. Чем выше порядок гармоники, тем больше уровень помех, наведенных ими в телекоммуникационных кабелях.

Пути решения проблемы

Косинусные шунтирующие конденсаторы

Шунтирующие конденсаторы, установленные в передающих и распределительных сетях, увеличивают пропускную способность, уменьшают потери и улучшают коэффициент мощности ($\cos \phi$). Высоковольтные батареи для различного уровня напряжения и мощности могут быть спроектированы для последовательного и параллельного подсоединения однофазных конденсаторных блоков.

Шунтирующие конденсаторы главным образом используются для улучшения коэффициента мощности ($\cos \phi$) в сети. Любые индуктивные нагрузки потребляют реактивную мощность, которая идет, например, на намагничивание трансформаторов, двигателей и дросселей. Требуемая реактивная энергия может быть сгенерирована при помощи конденсаторов.

Используя конденсаторы, которые установлены рядом с оборудованием, потребляющим реактивную энергию, можно достичь ряда положительных моментов:

- улучшения коэффициента мощности ($\cos \phi$);
- уменьшения потерь при передаче;
- увеличения пропускной способности, так как нагрузка на генераторы, трансформаторы и ЛЭП снижается;
- улучшения регулирования напряжения;
- улучшения качества электроэнергии.

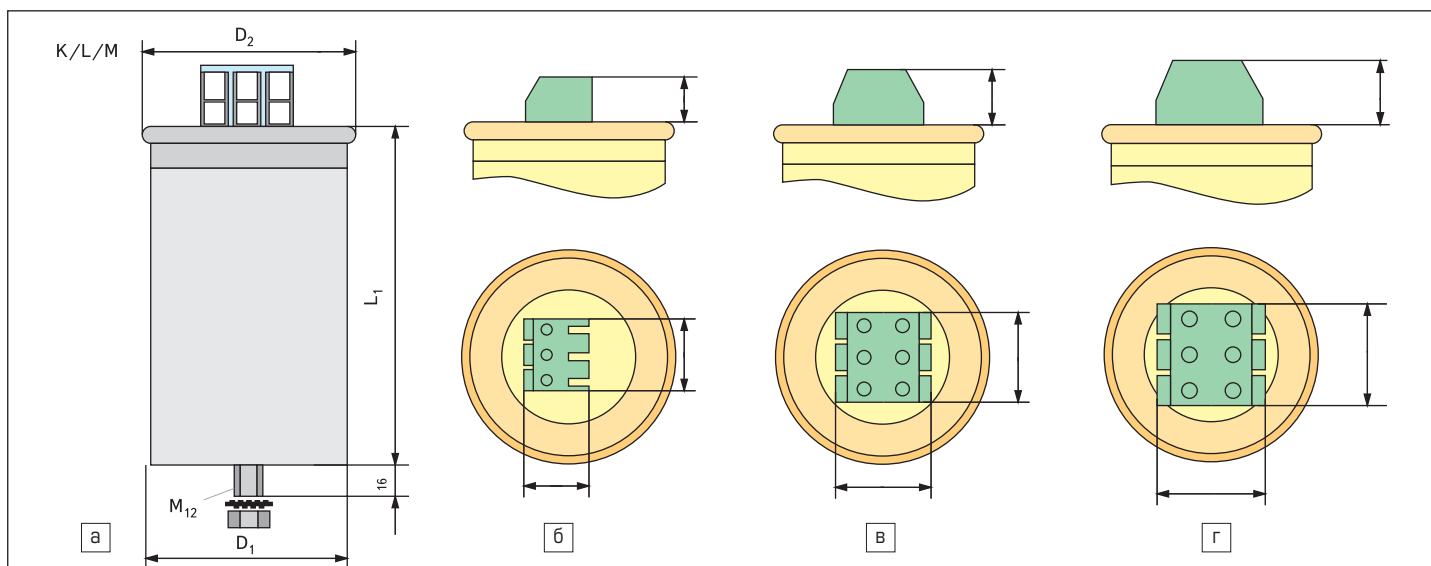


Рис. 7. а) Общий чертеж серии 275.xxx;

б) Исполнение К. Конденсаторы диаметром 60–85 мм. Корпус: прессованный алюминий с крепежной шпилькой (M12) и герметичной алюминиевой крышкой с закаткой. Блок выводов: максимальная площадь сечения кабеля $1 \times 10 \text{ мм}^2$ на каждый контакт (с гильзовым наконечником 6 мм^2). Максимальный ток до 40 А на фазу. Разрядный модуль вмонтированный (разряд $<50 \text{ В}$ за 60 с);

в) Исполнение L. Конденсаторы диаметром 85–116 мм. Корпус: прессованный алюминий с крепежной шпилькой (M12) и герметичной алюминиевой крышкой с закаткой. Блок выводов: максимальный размер кабеля $2 \times 25 \text{ мм}^2$ на каждый контакт (с гильзовым наконечником). Максимальный ток до 43 А на фазу. Разрядный модуль доступен по запросу как отдельный элемент;

г) Исполнение М. Конденсаторы диаметром 100–136 мм. Корпус: прессованный алюминий с крепежной шпилькой (M12) и герметичной алюминиевой крышкой с закаткой. Блок выводов: Максимальный размер кабеля $2 \times 50 \text{ мм}^2$ на каждый контакт (с гильзовым наконечником $2 \times 35 \text{ мм}^2$). Максимальный ток до 80 А на фазу. Разрядный модуль доступен по запросу как отдельный элемент

Конденсаторные фильтры

Многие нагрузки в электрических сетях, такие как преобразователи, выпрямители, сварочное оборудование и дуговые печи, генерируют гармоники. Из-за этого увеличиваются потери, и возрастает риск повреждения электронного оборудования. Фильтры гармоник позволяют решить эту проблему путем уменьшения содержания гармоник в сети. Они также улучшают коэффициент мощности ($\cos \phi$) за счет генерирования реактивной энергии.

Современное электрическое оборудование генерирует токовые гармоники, которые передаются в электрических сетях. Наибольший уровень гармоник создается электронно-управляемым оборудованием, таким как преобразователи, регулируемые приводы, статические преобразователи, сварочное оборудование и т. п., а также дуговыми печами. Среди проблем, которые появляются из-за повышенного содержания гармоник, можно выделить:

- увеличение потерь в двигателях, трансформаторах и кабелях, что может привести к их перегреву;
- перегрузка конденсаторов;
- повреждение или неправильное функционирование электронного оборудования;
- неправильное функционирование реле приёма в импульсно-управляемых системах;
- помехи в телефонных сетях.

Наиболее распространенным методом решения данных проблем является установка фильтров гармоник. Компонентами фильтров являются конденсаторы, дроссели и иногда резисторы. Конденсаторы представляют собой наиболее важную часть, поскольку именно они генерируют реактивную энергию.

Опыт и квалификация Electronicon в области производства различных фильтров гаранти-

руют надежное и экономически выгодное решение проблемы, связанной с наличием гармоник.

ELECTRONICON имеет все необходимые ресурсы, начиная от измерения содержания гармоник и расчета эффекта установки нового оборудования до производства и поставки соответствующих фильтров.

Новое поколение МКР-конденсаторов с экологически чистым наполнителем газом (азот)

Внешний вид конденсаторов серии 275.xxx (конструктив К, L, М), изготавливаемых по технологии МКРg (газонаполненные), показан на рис. 6.

Преимущества таких конденсаторов:

- абсолютная безопасность для окружающей среды;
- удобный монтаж при высокой степени защиты;
- герметичность и надежность;
- значительное уменьшение веса.

Конструктивные исполнения К, L, М гарантируют оптимальную герметичность конден-

саторов и удобное подключение кабелем диаметром до 50 мм^2 . Специальная пружинная система обеспечивает надежную и длительную работу зажимов. Конструктивное исполнение L и М также позволяет прямое подключение разрядных сопротивлений и разрядных модулей, так же как и параллельное подключение дополнительных конденсаторов. У однофазного исполнения центральный винт не имеет контакта.

Применение данных конденсаторов позволяет:

- снизить общие расходы на электроэнергию благодаря улучшению коэффициента мощности;
- при той же общей мощности снабжать дополнительных потребителей полезной нагрузкой благодаря уменьшению реактивной нагрузки;
- уменьшать нагрузку компонентов распределительной сети и увеличивать срок их службы благодаря улучшению коэффициента мощности.

Фильтрующие дроссели резонансной цепи

Потребителю, в сети которого содержится большое количество выпрямителей, электроприводов с управляемым числом оборотов или других производителей высших гармоник, часто требуется конденсаторная батарея с фильтрацией. Такая установка одновременно с компенсацией уменьшает вызванную высшими гармониками перегрузку и отфильтровывает большую часть высших гармоник.

Последовательным включением дросселя и силового конденсатора создается резонансный контур. Резонансная частота этого контура лежит ниже частоты самой маленькой



Рис. 6. Однофазные и трехфазные конденсаторы, диаметром от 60 до 136 мм, корпус — прессованный алюминий

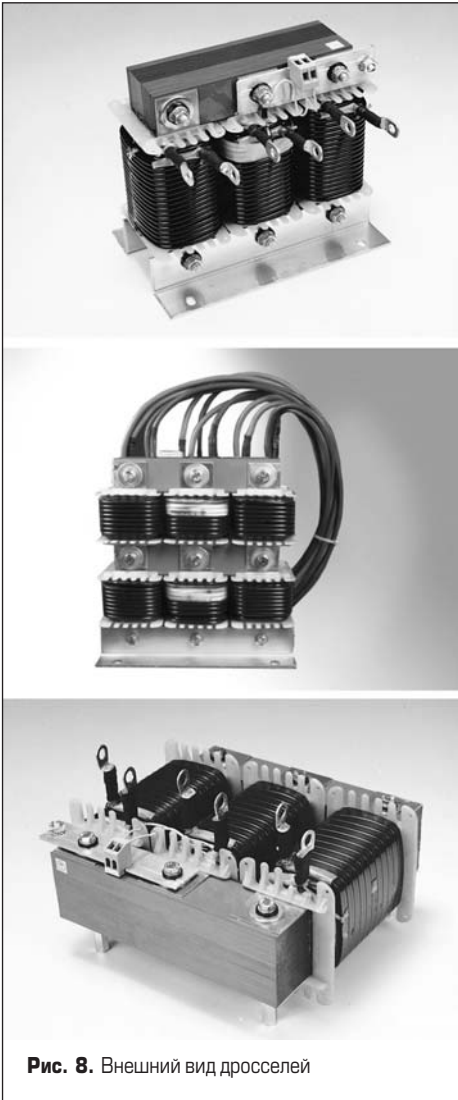


Рис. 8. Внешний вид дросселей

гармоники сети (чаще всего 5-й). Поэтому для всех других гармоник, лежащих выше этой резонансной частоты, схема является индуктивной, и опасность резонанса между конденсаторной установкой и индуктивностью сети исключается.

Для таких целей ELECTRONICON предлагает однофазные и трехфазные дроссели. Они изготавливаются из специально отобранной трансформаторной жести по технологии плоских или круглых медных проводов. Большой срок службы и высокая электрическая прочность достигаются путем вакуумной сушки и пропитки. Дроссели поставляются с соединительными клеммами. В зависимости от номинальной мощности предлагаются дроссели с боковыми выводами или гибкими теплоустойчивыми проводами.

При превышении температуры в 125 °C встроенный тепловой выключатель отсоединяет дроссель от сети.

Основные параметры:

- нагрузка высшими гармониками при 100%-ной продолжительности включения: $U_3 = 0,5\%U_N$; $U_5 = 6,0\%U_N$; $U_7 = 5,0\%U_N$; $U_{11} = 3,5\%U_N$; $U_{13} = 3,0\%U_N$;
 - нагрузка основной частотой: $I_1 = 1,1 \dots I_N$;
 - ферромагнитные данные: $I_{lin} = 1,6 \dots 2,2 \times I_N$.
- Конструктивные особенности:
- вид: трехфазный с железным сердечником и двойным воздушным зазором;
 - класс защиты: IP00, внутренний монтаж;
 - класс изоляции: T 40/B;
 - вид охлаждения: самоохлаждаемый;
 - материал витков: медь;
 - пропитка: лавсановая смола, класс F;
 - подключение: клеммы или выводы на торцевой стороне или гибкие провода;

- изоляция: kern обмотки 3 кВ;
- контроль температуры: тепловой выключатель, температура отключения 125 °C;
- точность настройки: $L = \pm 3\%$;
- основные положения: VDE 0570 Teil 2/EN 61558-2-20.

Дроссели, в зависимости от предъявляемых требований, изготавливаются в различных конструктивах. На рис. 8–9 приведены наиболее часто применяемые решения — их внешний вид и конструктивное исполнение.

Заключение

Для энергосистем (особенно крупных предприятий) реактивная энергия всегда была и остается неизбежным атрибутом технологического оборота электроэнергии, влияющим на его экономическую эффективность. В последнее время, в связи со значительным ростом цен на энергоносители, повысился приоритет вопросов энергосбережения. Использование компонентов для компенсации реактивной мощности — один из наиболее простых и эффективных способов энергосбережения в промышленных и коммунально-бытовых распределительных сетях.

Применение компонентов производства ELECTRONICON (конденсаторов, дросселей, регуляторов, пускателей, разрядников) позволяет:

- поддерживать необходимый коэффициент мощности установок потребителя;
- повысить качество электроэнергии непосредственно в сетях предприятия;
- снизить общие расходы на электроэнергию;
- уменьшить нагрузку элементов распределительной сети, увеличить их срок службы.

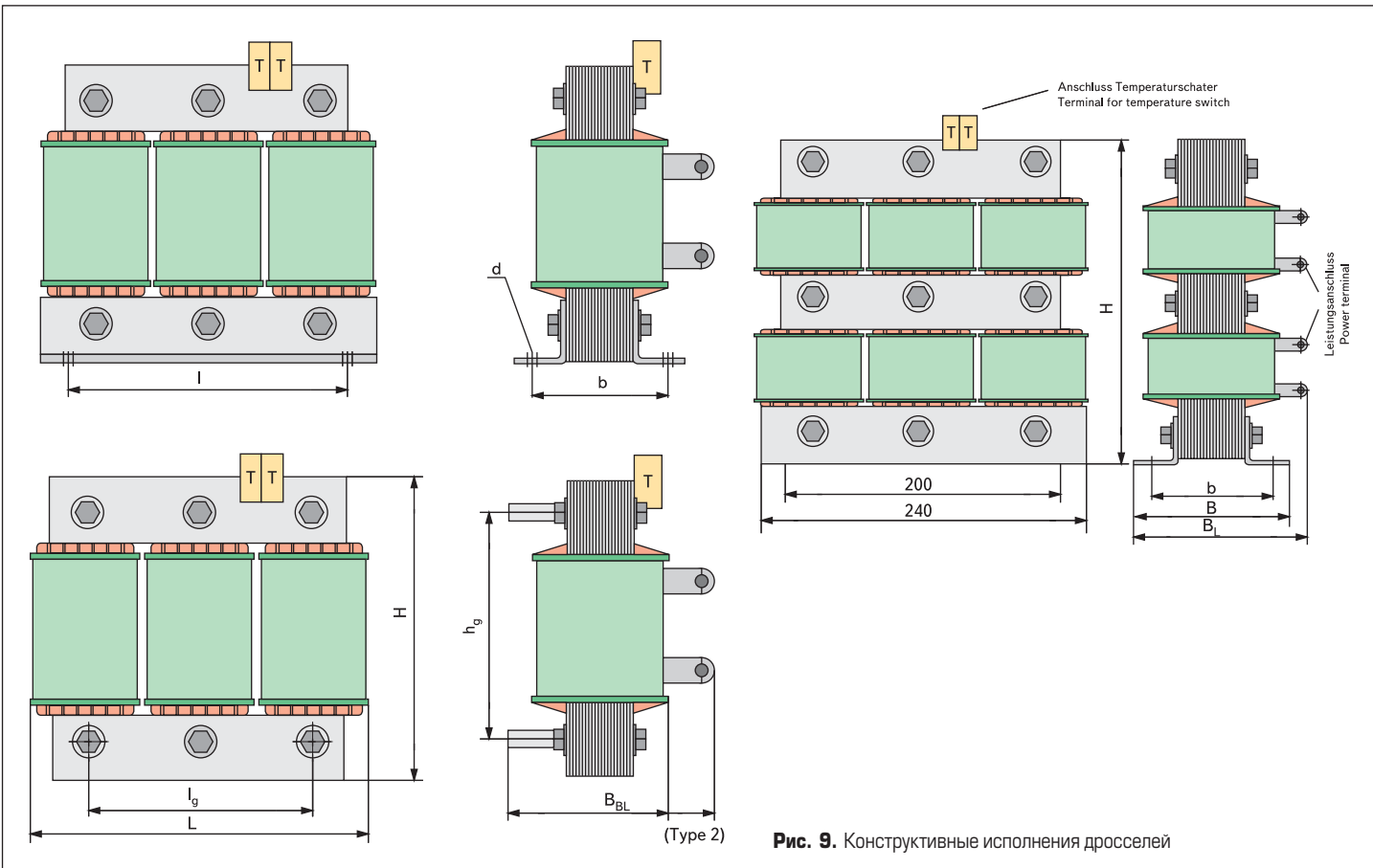


Рис. 9. Конструктивные исполнения дросселей