

Измерения помех, формируемых двигателями постоянного тока, с помощью приборов компании Rigol

Часть 1

Н. Лемешко¹, М. Горелкин²

УДК 535.131:621.317 | ВАК 2.2.4

В настоящее время обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) стало неотъемлемой частью выполнения различных проектов в области электроники, электротехники, энергетики и электротранспорта. Практика показала, что проблемы ЭМС решаются гораздо дешевле и эффективнее, если им уделять необходимое внимание на каждой стадии проектирования электронных устройств (ЭУ). В данной статье рассматриваются основные причины формирования кондуктивных электромагнитных помех электродвигателями постоянного тока (ЭДПТ), оценивается влияние технического состояния и условий эксплуатации ЭДПТ на уровень помехоэмиссии, описываются методы снижения и способы измерений помех, формируемых ЭДПТ.

При решении задач обеспечения ЭМС принято выделять внешнюю и внутреннюю электромагнитную обстановку [1], а электромагнитные помехи (ЭМП) – разделять на кондуктивные, распространяющиеся в проводящих средах, и излучаемые. При этом важно помнить, что кондуктивные и излучаемые помехи способны многократно трансформироваться друг в друга, и поэтому их стараются либо локализовать около источника, либо защитить от помех чувствительные элементы ЭУ. Таким образом, внешняя и внутренняя электромагнитная обстановка не отделяются друг от друга конструктивными границами ЭУ, если только для этого не предприняты выработанные в сфере ЭМС специальные меры, которые реализуются, например, фильтрацией и экранированием.

В общем случае ЭМП, формирующие электромагнитную обстановку для некоторой части ЭУ, отличаются совершенно разным происхождением. Для выработки первичных мер по их парированию принято использовать более глубокую классификацию (рис. 1), которую мы рассмотрим, подразумевая, что она распространяется и на кондуктивные, и на излучаемые помехи [2]. Прежде всего ЭМП делятся на широкополосные и узкополосные, и это их свойство принято определять по отношению к типовой полосе пропускания

среднестатистического приемного устройства для рассматриваемого диапазона частот. Если с выбором такой полосы есть затруднения, то можно считать, что к широкополосным ЭМП относятся те, для которых отношение полосы частот к ее среднему значению более 0,1.

Узкополосные ЭМП генерируются, например, промышленными, научными, медицинскими и бытовыми высокочастотными устройствами. Широкополосные ЭМП создает большинство источников: трамваи, троллейбусы, электропоезда, тяговые подстанции электротранспорта, автомобили, высоковольтные линии электропередачи и их подстанции, станки с электроприводом, крановое оборудование, лифты, люминесцентные светильники, коммутационная аппаратура всех назначений, торговые автоматы, электроинструмент, автоматические регуляторы и др.

В зависимости от времени действия ЭМП разделяются на длительные и прерывистые. К длительным ЭМП относятся помехи, длительность которых, измеренная в регламентированных условиях, составляет не менее 1 с. Длительные ЭМП могут быть широкополосными (создаются переключающими устройствами, линиями электропередач, автомобилями, электротранспортом и др.) и узкополосными (создаются промышленными, научными и медицинскими высокочастотными устройствами).

К прерывистым ЭМП относят помехи, продолжающиеся в течение определенных периодов времени, разделенных интервалами, свободными от ЭМП. Прерывистые ЭМП, как правило, являются широкополосными.

¹ АО «Корпорация «Комета», начальник отдела, nlem83@mail.ru.

² ООО «РШ Тех», менеджер по продукту, mikhail.gorelkin@rsh-tech.ru.

Они создаются холодильниками, утюгами, термостатами и др. Одним из видов прерывистых ЭМП являются кратковременные ЭМП. К кратковременным относятся ЭМП, длительность которых, измеренная в регламентированных условиях, составляет не более 0,2 с.

Помимо представленной классификации, ЭМП следует дифференцировать и по энергетике – важному показателю, во многом определяющему способность помех проявлять негативное действие в ЭУ. Если говорить об электродвигателях постоянного тока, которые будут являться объектом дальнейшего рассмотрения, то они формируют длительные широкополосные помехи, как это будет следовать из приводимого ниже анализа. Что касается энергетики помех, то для ЭДПТ она может достигать уровня, при котором, например, наблюдаются сбои в цифровых узлах того же ЭУ и блокируются сигналы радиоуправления в радиусе нескольких метров от ЭДПТ, если оно осуществляется в метровом и дециметровом диапазонах волн. Учитывая широкую распространенность ЭДПТ разной мощности, развитие электротранспорта и беспилотных систем, а также многочисленные примеры из практики, когда помехи ЭДПТ становились серьезной проблемой, необходимо рассмотреть данный вопрос более подробно и определить мероприятия, обеспечивающие эффективное парирование помех такого рода.

ПРИЧИНЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМП ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Чтобы определить причины формирования помех ЭДПТ, следует рассмотреть их типовую конструкцию (рис. 2). Принцип действия любых электродвигателей основан на взаимодействии магнитных полей, порожденных разными источниками. В ЭДПТ такие поля формируются за счет электрических токов, протекающих через обмотку возбуждения и обмотки якоря. Из физики известно, что наибольшая сила взаимного притяжения и отталкивания при взаимодействии магнитных полей достигается при параллельности их силовых линий. Для того, чтобы ЭДПТ обладал максимально равномерным вращением и отдачей механической мощности в нагрузку, необходимо, чтобы магнитные поля, формируемые обмотками возбуждения и якоря, удовлетворяли этому условию, либо, по крайней мере, были близки к его выполнению.

Однако при угловом смещении ротора сила его взаимодействия со статором будет снижаться, если не предпринято мер к ее восстановлению. За это в ЭДПТ отвечает пара щеточных контактов, которые скользят по пластинам коллектора, между которыми имеется некоторый зазор. Обычно коллекторные пластины выполняются из твердотянутой меди. Щетки изготавливают прессованием графитного либо угольного порошка, причем для снижения электрического сопротивления и повышения стойкости к износу в него добавляют мелкодисперсный медный порошок, полученный

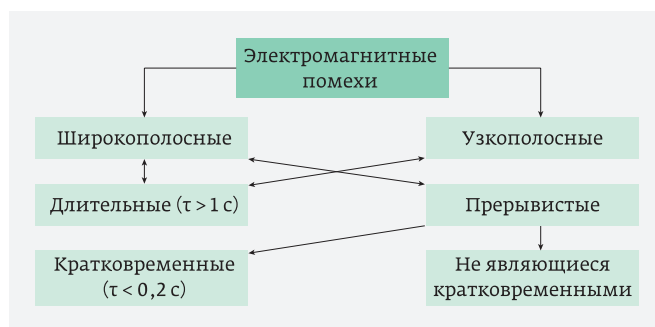


Рис. 1. Классификация ЭМП по ширине полосы и длительности

электролизом. Исходя из соображений прочности, долговечности и нагревостойкости, щетки для ЭДПТ невозможно сделать слишком тонкими – например, менее ширины пластины коллектора. Собственно, неравномерность протекания тока через щеточно-коллекторные переходы в ЭДПТ и является причиной появления ЭМП.

Исходя из анализа типовой конструкции щеточно-коллекторного узла, можно выделить три причины возникновения электромагнитных помех в ЭДПТ (рис. 3):

1. Искрение при трении щеток о пластины коллектора.
2. Колебания потребления тока при подключении/отключении обмоток якоря.
3. Индукционные перенапряжения при отключении обмоток якоря.

Искрение при трении щеток о пластины коллектора имеет ту же природу, что и для любого скользящего контакта. Через щетки формально протекает постоянный

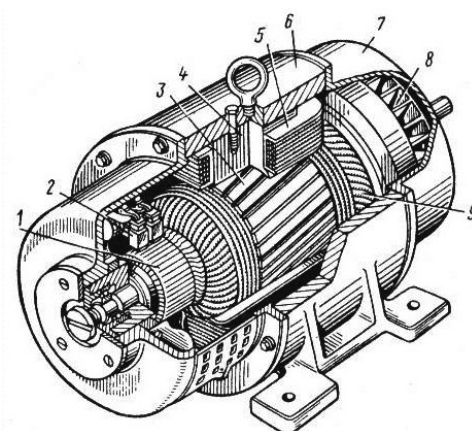


Рис. 2. Типовая конструкция ЭДПТ: 1 – коллектор; 2 – щеточный контакт; 3 – сердечник якоря; 4 – сердечник индуктора (полюса); 5 – обмотка возбуждения; 6 – корпус; 7 – крышка вентилятора; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

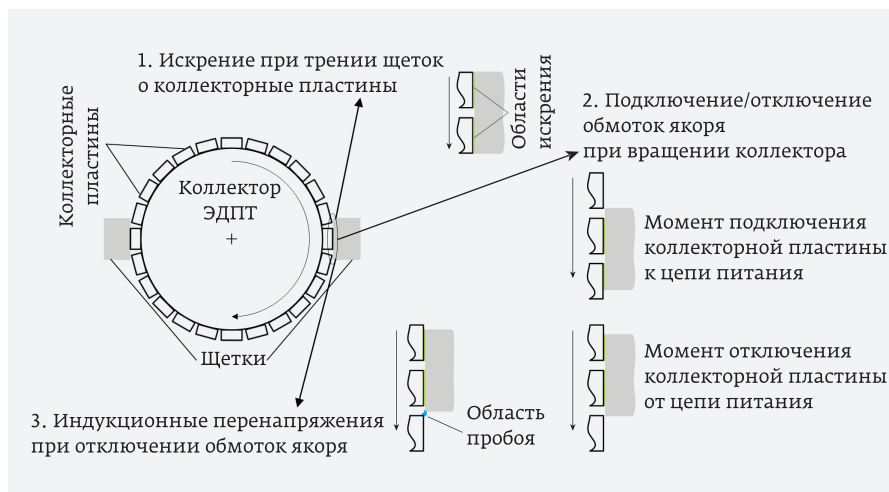


Рис. 3. Три механизма возникновения ЭМП в щеточно-коллекторном узле ЭДПТ

ток, однако его значение претерпевает колебания за счет изменения электрического сопротивления при угловом смещении якоря. В местах большего сопротивления повышается падение напряжения, возникает локальный нагрев, приводящий к искрению. С учетом того, что протекающий через щетки ток может иметь значения до нескольких ампер, а площадь поверхности электрического контакта щеток с коллекторными пластинами сравнительно небольшая, плотность тока в областях искрения оказывается значительной, искрение оказывается подобно электрической дуге с невысоким падением напряжения. Если говорить о визуальном проявлении, то оно имеет вид локализованного в области контактного перехода зелено-желтого свечения, причем зеленый цвет такой дуге придает сгорание частиц меди и основного материала щеток.

Интенсивность помех, вызванных трением щеток о пластины коллектора, а также их спектральный состав зависят от скорости вращения и тока в обмотках якоря, механического состояния щеток. Считается, что полоса частот помехоэмиссии, обусловленной этим фактором, может простираться до 300 МГц [1], однако практика применения ЭДПТ большой мощности показала, что при неблагоприятных условиях это значение может возрасти до 700–1000 МГц, то есть перекрывать нижнюю четверть дециметрового диапазона радиоволн.

Колебания потребления тока при подключении/отключении обмоток якоря указываются в литературе, например в [3], как одна из основных причин формирования ЭМП ЭДПТ. Действительно, в процессе углового смещения якоря в контактной системе, образованной щетками и коллекторными пластинами, наблюдается цикличность подключения и отключения обмоток

якоря. Эти обмотки имеют сравнительно небольшое количество витков – от 1 до 20 шт. в зависимости от назначения, мощности ЭДПТ и других факторов. Обмотки сформированы в пазах якоря, который обычно выполнен из пластин трансформаторной стали для снижения потерь на вихревые токи. Поскольку воздушный зазор между якорем и полюсами индуктора обычно мал, то индуктивность сориентированных в направлении полюсов индуктора обмоток, подключенных к источнику питания через контактные пластины коллектора, оказывается весьма значительной. Это приводит к тому, что при подключении очередной обмотки якоря к щеткам ток через нее нарастает по экспоненциальному закону,

но к моменту времени отключения обмотки не успевают увеличиться до потенциального максимума и в целом изменяется практически по линейному закону. При отключении обмотки от цепей электропитания ток спадает существенно быстрее, поскольку запасенная индуктивностью энергия тратится на пробой образовавшегося воздушного промежутка между коллекторной пластиной и щеткой. Таким образом, колебания тока за счет подключения и отключения обмоток якоря к щеткам имеют пилообразный характер.

На рис. 3 коллекторные пластины в количестве $k = 24$ шт. показаны с шагом 15° , они изображены абсолютно симметрично, аналогично расположены на рисунке и щетки. Поэтому в упрощенном представлении такие коммутационные процессы происходят синхронно для обоих щеток, соответственно, за один оборот статора их количество составит $0,5k$. Если электродвигатель обеспечивает скорость вращения якоря N об./с, то частота изменения тока составит $F = 0,5kN$. Если коллектор имеет 24 пластины и частота вращения якоря составляет 50 об./с, то для ЭДПТ типовой конструкции частота F составит 600 Гц. Как отмечается в [3], для ЭДПТ некоторых конструкций $F = kN$.

Рассмотренная качественная модель формирования помех при коммутации обмоток якоря распространяется только на случай, когда ЭДПТ имеет две щетки. Существуют машины постоянного тока [4], в которых в целях достижения специальных характеристик используются чередующиеся полюса индукторов в четном количестве, а также большее количество щеток. Для таких ЭДПТ подсчет частоты коммутационных импульсов тока должен осуществляться с учетом конструктивных особенностей.

Индукционные перенапряжения при отключении обмоток якоря возникают с той же частотой, что и колебания тока. Индуктивность отключаемой обмотки запасает энергию, пропорциональную квадрату тока на момент отключения. В соответствии с принципами самоиндукции после возникновения воздушного зазора между пластиной коллектора и щеткой эта индуктивность, стремясь поддержать резко снизившийся ток, развивает на нем напряжение, достаточное для пробоя. Его возникновению способствует также разогрев щеток и пластин коллектора, а также локальная ионизация в области их трения.

Разряд, вызванный индукционным перенапряжением, имеет другую природу, чем искрение в области скольжения пластин коллектора по щеткам. Он отличается низким средним током и большим напряжением и не переходит в дуговой. Это подтверждается тем фактом, что в направлении вращения якоря искрение всегда больше, и оно имеет близкий к белому цвет свечения, отличающийся от аналогичного для мест скольжения щеток по пластинам коллектора.

Интенсивность рассматриваемой составляющей помехоэмиссии определяется мощностью электродвигателя, током в обмотках якоря, а также скоростью вращения. Возникающие индукционные перенапряжения приводят к большему износу щеток в направлении вращения якоря, что в обслуживании машин постоянного тока является привычным фактом.

Применяемые в некоторых детских игрушках и других устройствах ЭДПТ на основе постоянных магнитов работают по точно такому же принципу за исключением отсутствия обмоток главных полюсов. Такие ЭДПТ, как правило, не отличаются большой мощностью.

Как следует из изложенного, ЭДПТ формируют широкополосные и узкополосные составляющие ЭМП. Причины их появления тесно переплетены, и разделить эти составляющие даже при использовании современных средств измерений не всегда удается. Качественный анализ формируемой ЭДПТ картины помех позволяет сделать следующие выводы:

1. Повышение тока через обмотки якоря ЭДПТ, в том числе при увеличении напряжения электропитания, приводит к увеличению помехоэмиссии.
2. Огибающая помехоэмиссии в частотной области будет иметь спадающий характер. Наибольшая спектральная плотность ЭМП будет соответствовать низкочастотной части диапазона.
3. Механическое нагружение ЭДПТ будет приводить к повышению полной мощности ЭМП и изменять характер их распределения по спектру, по-видимому, с повышением их энергии в низкочастотной области.
4. Выход ЭДПТ на установившийся рабочий режим, сопровождающийся увеличением температуры щеток, будет характеризоваться повышением уровня ЭМП.

5. Любой дисбаланс и асимметрия в конструкции якоря и полюсов ЭДПТ будет приводить к дополнительной модуляции компонентов ЭМП при вращении, что будет приводить к расширению полосы частот помехоэмиссии и, возможно, к увеличению их интенсивности.

В части механической нагрузки ЭДПТ при формировании ЭМП следует рассматривать следующие частные случаи:

1. Холостой ход ЭДПТ соответствует случаю, когда формируются ЭМП наименьшей интенсивности.
2. ЭДПТ работает с нагрузкой, существенно замедляющей вращение якоря. В этом режиме через коллекторные пластины будет протекать больший ток, чем на холостом ходу. Повышение тока через обмотки якоря при снижении угловой скорости не устраняет искрение, характер его изменения зависит от особенностей ЭДПТ. Увеличение длительности соприкосновения каждой пластины коллектора со щеткой будет приводить к увеличению интенсивности помех, вызванных цикличностью подключения/отключения обмоток якоря к источнику электропитания. Индукционные перенапряжения также будут усиливаться, поскольку снижение линейной скорости размыкания коллекторных пластин и щеток снижает необходимое напряжение пробоя и увеличивает его средний ток. Следовательно, эрозия щеток будет усиливаться.
3. Вал двигателя застопорен. В этом случае нет углового перемещения коллектора относительно щеток, следовательно, формирование ЭМП наблюдаться не будет. Ясно, что такой режим для ЭДПТ является аварийным.

Способы борьбы с помехами ЭДПТ можно разделить на два всеобъемлющих класса. Первый связан с улучшением технического состояния электродвигателя, второй – с реализацией способов снижения помехоэмиссии посредством применения фильтрации и экранирования. Ввиду важности вопроса рассмотрим оба направления.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭДПТ НА УРОВЕНЬ ПОМЕХОЭМИССИИ

ЭДПТ, как и другие электромеханические устройства, подлежат настройке, регулировке и техническому обслуживанию разных категорий в зависимости от наработки [5]. Рассмотрение качественных и количественных характеристик технического состояния ЭДПТ выходит за рамки данной статьи, поэтому здесь рассмотрим только факторы, влияющие на формирование ЭМП.

На искрение в щеточно-коллекторном узле влияют два основных фактора – степень износа щеток и сила, прижимающая их к коллектору. Повышение износа всегда

увеличивает искрение и уровень ЭМП. Что касается прижимающей силы, то ее выбирают из допустимого предела по критерию фактической минимизации искрения. Применение нестандартных щеток большей ширины в ЭДПТ недопустимо и также увеличивает ЭМП. Вибрация обойм щеток при эксплуатации ЭДПТ ведет к тому же результату. Твердость и материал щеток должны соответствовать условиям их применения.

Не менее важно состояние пластин коллектора. Известно [6], что скользящие контакты, даже выполненные из меди, все равно покрываются нагаром. Нагар, образующийся на коллекторных пластинах ЭДПТ, увеличивает переходное сопротивление и, соответственно, искрение и уровень ЭМП.

В ходе эксплуатации ЭДПТ изнашиваются не только щетки, но и коллекторные пластины. Если их высота станет менее допустимого значения, то щетки будут задевать за непроводящий материал основы коллектора, в качестве которого часто используется слюда, и подкидываться при вращении якоря, что также увеличивает искрение, в том числе его индукционную компоненту, а заодно – и износ щеток. К этому же эффекту приводит наличие царапин и других дефектов на пластинах.

В качестве диагностического признака для оценки технического состояния ЭДПТ в части формирования ЭМП можно использовать характер искрения. В частности:

- если при вращении якоря искрение неравномерное, то, возможно, некоторые обмотки якоря оборваны или имеют межвитковые либо короткие замыкания;
- определить обмотки якоря, в которых образовался обрыв или замыкание, можно путем осмотра коллекторных пластин: в первом случае нагар будет меньше, во втором больше.

Наличие межвитковых и коротких замыканий в обмотках якоря создает выраженные импульсные ЭМП и в некоторых случаях может быть обнаружено на осциллограмме

потребляемого тока. Наличие замыканий в обмотках якоря всегда увеличивает эмиссию помех.

Механические факторы, увеличивающие искрение в щеточно-коллекторном узле, состоят в следующем:

- смещение щеточной траверсы относительно нормального положения;
- деформация скользящей поверхности коллектора по любым причинам;
- асимметрия расположения главных полюсов, нарушение расстояния между обмотками якоря при изготовлении ЭДПТ.

Наконец, увеличивать ЭМП могут следующие эксплуатационные факторы:

1. Пылевая взвесь в воздухе в месте эксплуатации проникает внутрь ЭДПТ, оседает на щеточно-коллекторном узле и усиливает искрение.
2. Доказано, что снижение влажности воздуха увеличивает искрение в щеточно-коллекторном узле.
3. Угловая неравномерность механической нагрузки приводит к асимметричному вращению якоря и циклическому изменению зазора между ним и индуктором. Это может приводить к увеличению искрения. Примером является использование ЭДПТ в приводах с перетянутой ременной передачей.
4. Довольно редким является случай расположения ЭДПТ в области действия сильных магнитных постоянных и переменных полей (вблизи других электродвигателей, главных фидеров и шинопроводов, трансформаторов, реакторов). Такое расположение способно вызывать подмагничивание конструкций ротора и якоря ЭДПТ, что во многом эквивалентно геометрической либо нагрузочной асимметрии двигателя.
5. Эксплуатация ЭДПТ при частоте вращения сверх номинальной, появление локальных резонансных явлений.
6. В некоторых промышленных установках ЭДПТ устанавливаются на станины, вибрация которых вызывается сторонними причинами. В этом случае резонансные явления в узлах ЭДПТ способны усилить искрение.

Анализируя перечисленные факторы, можно путем обслуживания и ремонта целенаправленно менять техническое состояние и условия эксплуатации ЭДПТ в целях снижения помехоэмиссии, если это критично.

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПОМЕХОЭМИССИИ ЭДПТ

Распространение ЭМП от ЭДПТ осуществляется посредством проводящих сред и излучения. Кондуктивный механизм определяется подключением щеток к источнику электропитания через выводы в корпусе ЭДПТ. Как правило, к тому же источнику электропитания подключаются другие токопотребители, и они

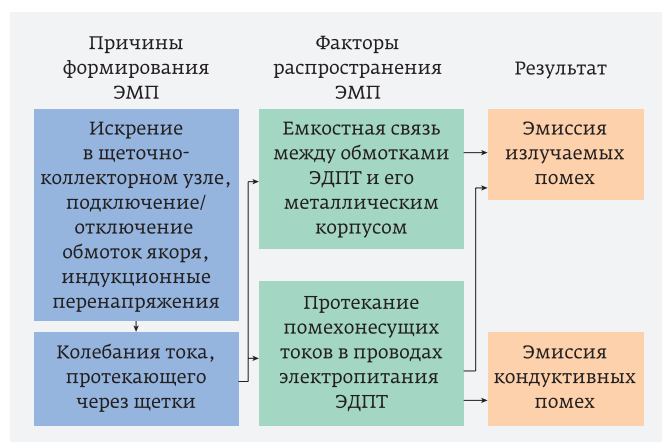


Рис. 4. Взаимосвязь механизмов формирования ЭМП ЭДПТ

подвергаются действию сформированных электромагнитных помех. Что касается механизма излучения, то он реализуется в двух видах. Во-первых, излучаемые помехи формируются проводами питания ЭДПТ. Во-вторых, излучение непосредственно от мест контактных переходов между щетками и коллекторными пластинами наводится на проводящий корпус ЭДПТ посредством емкостного механизма и далее переизлучается в окружающее пространство. Ориентировочно полоса частот помехоэмиссии ЭДПТ простирается до 300 МГц, эта частота соответствует длине волны 1 м в свободном пространстве. Это означает, что элементы конструкции ЭДПТ и цепи электропитания могут оказываться в резонансных условиях и эффективно излучать такие помехи. Взаимосвязь механизмов формирования ЭМП ЭДПТ пояснена на рис. 4.

Основной подход к снижению помехоэмиссии будет состоять в локализации контуров протекания помехонесущих токов и максимальном снижении их площади. Это достигается минимизацией длины проводов питания ЭДПТ, а также применением фильтрующих и экранирующих элементов. Особенностью осуществления таких мероприятий является то, что для цепей постоянного тока понятие заземления в привычном виде отсутствует.

Типовые решения в части фильтрации показаны на рис. 5 для реверсивных и нереверсивных ЭДПТ. Схемы предполагают изоляцию обмоток ЭДПТ от его корпуса и в каждом конкретном случае включают элементы, признанные необходимыми. Рассмотрим схему для реверсивных ЭДПТ. В ней конденсатор C_1 подключается между выводами ЭДПТ, а C_2 и C_3 – между ними и корпусом двигателя. Назначение C_1 состоит в обеспечении кратчайшего пути протекания помехонесущего тока, инжектированного ЭДПТ через выводы питания. Пара других емкостей предназначена для снижения эмиссии излучаемых ЭМП, вызванных емкостной связью между обмотками и корпусом ЭДПТ. В некоторых случаях целесообразно заменить емкость C_1 на RC-цепь, чтобы сгладить возможный резонанс токов в колебательном контуре, образованном индуктивностью обмоток ЭДПТ и емкостями. Такой резонанс будет характеризоваться всплеском помехоэмиссии на его частоте.

Ферритовые втулки (ФВ) FV_1 и FV_2 создают повышенное сопротивление для помехонесущего тока на частотах выше 25–50 МГц. Важно обратить внимание, что ФВ работают за счет взаимодействия помехонесущего тока с ферритом через магнитное поле. Токи, проходящие в проложенных через ФВ проводниках, могут исчисляться десятками ампер и создавать магнитное поле, переводящее материал ФВ в состояние магнитного насыщения, в котором фильтрующие свойства ФВ и вносимое активно-индуктивное сопротивление сильно падают. Ввиду этого, в отличие от случаев, когда через ФВ проходят парные токи, следует использовать весьма массивные

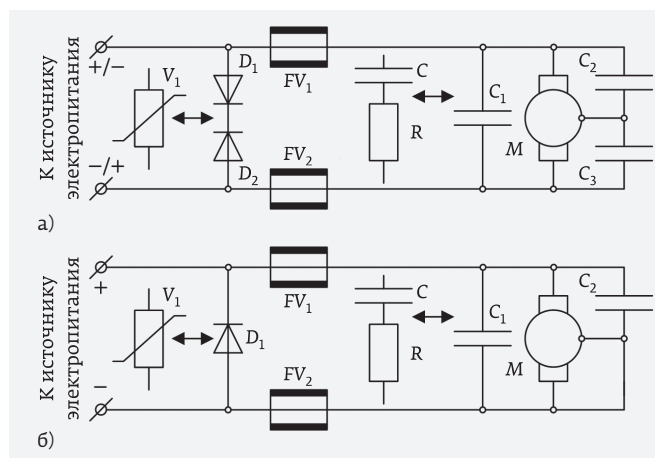


Рис. 5. Типовые решения в части фильтрации ЭМП:
а – для реверсивных ЭДПТ; б – для нереверсивных ЭДПТ

ФВ, оставляя небольшой воздушный зазор между ними и проводником.

Ограничивающие элементы, показанные на рис. 5, в зависимости от мощности и напряжения электропитания ЭДПТ могут быть представлены варисторами, стабилитронами или диодами. Эти элементы необходимы для блокирования индукционного выброса при остановке ЭДПТ, способного вывести из строя управляющий ключ при электронном управлении ЭДПТ. При напряжении питания 24 В такое перенапряжение может составить до 50 В и более.

Все элементы в схемах на рис. 5 подбираются под конкретную – известную или предполагаемую – картину помехоэмиссии. Типовой номинал емкостей обычно лежит в интервале 1–1000 нФ. ФВ выбираются подходящей геометрии и объема, с зависимостями полного сопротивления от частоты, наиболее подходящими для блокирования помех в диапазоне от 1 МГц и выше.

Для повышения эффективности фильтрации применяют каскадное включение фильтрующих звеньев, а сами фильтрующие элементы размещают как можно ближе к ЭДПТ, используя проводники минимальной длины. Место подключения проводников к корпусу ЭДПТ должно быть защищено от коррозии. Применение дросселей вместо ФВ не будет эффективным. Известно [7], что магнитная проницаемость электротехнических сталей и пермаллоев, из которых в основном и делают магнитопроводы дросселей, снижается с ростом частоты, причем это снижение составляет до одного порядка на частотах 10–100 кГц, а эмиссия ЭМП ЭДПТ оказывается куда более широкополосной.

На рис. 6 показаны картины эмиссии кондуктивных помех для ЭДПТ без фильтра и при использовании двухкаскадного фильтра [8]. Там же показаны нормы ЭМП для

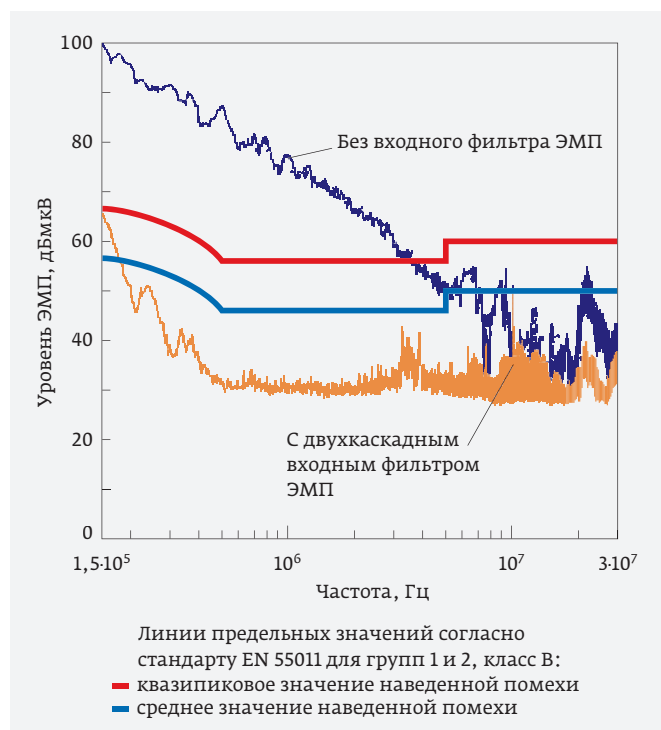


Рис. 6. Пример снижения уровня эмиссии кондуктивных ЭМП ЭДПТ при использовании двухкаскадного фильтра [8]

квазипиковых и средних значений по стандарту EN 55011. Как видно из представленных графиков, использование фильтров при правильном подборе элементов позволяет снизить кондуктивные ЭМП на десятки децибел, что определяющим образом влияет и на эмиссию излучаемой компоненты.

До настоящего момента мы рассматривали только случаи питания ЭДПТ постоянным током. Вместе с тем, для регулировки скорости вращения широко применяются ШИМ-контроллеры, которые формируют импульсы с изменяемой длительностью. В этом случае в формирование ЭМП неизбежно вовлекается вся цепь питания — от контроллера до ЭДПТ. Если контроллер ШИМ сильно удален от ЭДПТ, то на его выход следует установить керамический конденсатор с номиналом 1–10 нФ. Для снижения распространения кондуктивных ЭМП в разветвленных цепях электропитания применяют совокупность электролитических и керамических конденсаторов, определяемую с учетом их собственных резонансных свойств [9].

Экранирование ЭДПТ лучше всего реализуется посредством применения корпусов из проводящих материалов. Классическая конструкция ЭДПТ сравнительно большой мощности, представленная на рис. 2 и включающая металлические корпус, подшипниковые кольца и якорь, представляет собой весьма эффективный экран,

если все части ЭДПТ хорошо пригнаны друг к другу и не имеют заметной коррозии и непроводящих покрытий в местах сочленения. Повысить эффективность экранирования можно путем установки вставок из мелкоячеистой хорошо проводящей сетки на вентиляционные отверстия ЭДПТ. В особо ответственных случаях, например при близком расположении микроконтроллеров и формирователей ШИМ, рекомендуется дополнительно экранировать провода электропитания ЭДПТ, подключая экран с обеих сторон к одному из полюсов.

Рассмотрение конструкторских и схемотехнических мероприятий, реализуемых в обеспечение ЭМС для двигателей переменного тока, выходит за рамки данной работы. Весьма подробное их обобщение, включая мнения ряда ведущих специалистов по ЭМС, можно найти в [8], здесь же отметим только основные подходы, которые не были рассмотрены выше. К ним относится использование трехфазных силовых кабелей с броней и дополнительным экраном, установка специальных модульных фильтров непосредственно в контактные коробки двигателей, применение регулирующих частоту вращения преобразователей переменного тока со встроенными фильтрами, развязывающих трансформаторов, ограничителей перенапряжения со специальными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Уильямс Т.** ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. Кармашева В.С., Кечиева Л.Н. М.: Издательский дом «Технологии», 2003. 540 с.
2. **Лемешко Н.В.** Обеспечение ЭМС изделий современной электроники. Авторский курс повышения квалификации. НОЧУ ДПО «Новая инженерная школа», 2018.
3. **Лютов С.А.** Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними. М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951. 239 с.
4. **Бютицкий И.Б., Музылева И.В.** Электрические машины. Двигатель постоянного тока. Курсовое проектирование. М.: Лань, 2018. 168 с.
5. **Поляков В.А.** Практикум по электротехнике. М.: Просвещение, 1977. 254 с.
6. **Бондарев Н.А., Чекулаев В.Е.** Контактная сеть. М.: Маршрут, 2006. 590 с.
7. **Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С.** Лекции по магнетизму. М.: Физматлит, 2005. 512 с.
8. Подавление электромагнитных помех электроприводов. Control Engineering, 2011. №4. Материал компании Yaskawa Electric. Интернет-ресурс <https://controlengrussia.com/e-lektroprivod/podavlenie-pomekh-ehlektroprivodov/>. Дата обращения 20.09.2023.
9. **Кечиев Л.Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616 с.

RIGOL

Possibilities and More



RIGOL RSA5065 АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА



ГРСИ № 88167-23

Основные характеристики

- Диапазон частот: от 9 кГц до 6,5 ГГц
- Чувствительность на 1 ГГц: -165 дБмВт/Гц с LNA
- Фазовый шум: -106 дБн на 500 МГц отс.10 кГц
- Доступная ширина полосы анализа в режиме реального времени: 5/40 МГц
- Стандартные функции автоматизированных измерений: T-Power, ACP, OBW, EBW, C/N ratio, THD, TOI
- Опция аналоговой демодуляции: (AM/ЧМ)

Сервисный центр:
+7 495 981 35 67
SERVICE@RSH-TECH.RU

Отдел продаж:
+7 495 981 35 60
INFO@RSH-TECH.RU

ООО «РШ ТЕХНОЛОГИИ»
WWW.RSH-TECH.RU



Реклама