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

Часть 2

Н. Лемешко, д.т.н.¹, М. Горелкин²

УДК 535.131:621.317 | ВАК 2.2.4

В первой части статьи, опубликованной в четвертом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2024 год, было рассказано об основных причинах формирования кондуктивных электромагнитных помех электродвигателями постоянного тока (ЭДПТ), оценено влияние технического состояния и условий эксплуатации ЭДПТ на уровень помехоэмиссии, описаны методы снижения помех, формируемых ЭДПТ. В данном номере рассматриваются способы анализа кондуктивных помех в сетях электропитания и приводится пример измерений кондуктивных помех, формируемых ЭДПТ, с использованием осциллографов Rigol MSO8204 и анализаторов спектра Rigol RSA5056-TG.

ТИПОВЫЕ СПОСОБЫ АНАЛИЗА КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Способы анализа ЭМП можно подразделить на расчетные и экспериментальные. Первые, как показал проведенный в [10] анализ, имеют ограниченное применение практически для любого класса объектов со сложной схемотехникой или конструкцией. Применительно к случаю ЭДПТ это обусловлено следующими причинами:

- До настоящего времени не создано моделей, достаточно точно описывающих формирование ЭМП в процессе искрения в подвижных контактах.
- Сложность построения моделей эмиссии ЭМП от ЭДПТ состоит в необходимости иметь полную информацию о конструкции двигателя и применяемых материалах. Модель помехоэмиссии должна охватывать не только щеточно-коллекторные переходы, но и учитывать все остальные элементы конструкции ЭДПТ, включая действие механических сил на них.
- Практически невозможно учесть динамику изменения механической нагрузки на валу ЭДПТ в реальных условиях эксплуатации. Метод наихудшего случая, широко применяемый в теории обеспечения ЭМС, может

быть ориентирован только на предельные скорости вращения и изменения нагрузочного момента.

 Как следует из проведенного выше анализа, картина ЭМП во многом является индивидуальной для ЭДПТ и проявляет существенную зависимость от его технического состояния.

По этим, а также некоторым другим причинам, кондуктивные ЭМП ЭДПТ на практике обычно исследуют экспериментально. Диапазон измерений обычно составляет от 9 кГц до 30 МГц. При проведении измерений помехоэмиссии необходимо соблюдать требования [11], обеспечивающие повторяемость и воспроизводимость их результатов. Условия эксплуатации ЭДПТ всегда предполагают подключение к источнику электропитания, который, однако, имеет неопределенное полное внутреннее сопротивление на высоких частотах. Кроме того, может наблюдаться инжекция кондуктивных помех и со стороны источника электропитания. Нормирование нагрузочного импеданса для ЭМП, формируемых объектом исследования, осуществляется с помощью эквивалентов сети [11, 12] — специальных устройств, также обеспечивающих защиту средств измерений от сетевого напряжения. Пример схемы эквивалента сети (ЭС), широко применяемой в зарубежных стандартах, представлен на рис. 7. Главными элементами, определяющими полное сопротивление эквивалента сети, являются входное сопротивление измерительного прибора, катушка индуктивности 50 мкГн и резистор сопротивлением 5 Ом. Остальные элементы схемы образуют фильтр верхних частот с частотой среза

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

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

ниже 9 кГц и обеспечивают развязку испытуемого оборудования от сети электропитания. ЭС выпускаются как отдельные устройства, отечественная нормативно-техническая база предусматривает использование разных их типов в зависимости от рода тока, количества фаз и частоты электросети. Для изделий специального назначения могут использоваться специальные ЭС.

Основным требованием, предъявляемым к ЭС, является соблюдение зависимости полного импеданса от частоты. На рис. 8 показана зависимость полного импеданса от частоты для двух эквивалентов сети типа 1 и типа 4 по стандарту [11]. Эквивалент сети типа 1 используется на частотах от 9 кГц до 150 кГц и обычно обозначается как 50 Ом/50 мкГн + 5 Ом, а типа 4 – на частотах от 0,15 до 30 МГц, обозначается 50 Ом/50 мкГн. В стандарте приводятся формулы для расчета полного импеданса в зависимости от частоты. ЭС перед использованием подлежат обязательной калибровке по значению коэффициента преобразования.

Современные средства измерений позволяют проводить измерения кондуктивных ЭМП во временной и в частотной областях. Классическим является применение анализаторов спектра с полосами пропускания 200 Гц и 9 кГц в диапазонах А (9–150 кГц) и В (0,15–30 МГц) по классификации Международного комитета по радиопомехам. Результаты, полученные при таких измерениях с использованием детекторов квазипиковых и средних значений, подлежат сопоставлению с нормами выбранных стандартов по аналогии с тем, как это показано на рис. 6. В рамках таких измерений следует обращать внимание на резонансные процессы, возникающие в фильтрах и схеме электропитания ЭДПТ в целом.

Что касается исследования помех во временной области, то такой анализ может дать представление об определяющих факторах помехоэмиссии ЭДПТ. Например, выраженная цикличность помех, выявленная в ходе автокорреляционного анализа, может указывать на существенные индукционные перенапряжения. По статистическому распределению напряжения помех можно также формулировать выводы об их преимущественных причинах и выбирать наиболее эффективные элементы для фильтров.

Особенно важно проводить анализ кондуктивных ЭМП во временной области в тех случаях, когда ЭДПТ работают в составе цифровых устройств либо являются их исполнительными элементами. Известно [9], что цифровые узлы, обладающие высоким быстродействием, способны реагировать на помехи по цепям питания из-за своего высокого быстродействия и формировать битовые ошибки, то есть демонстрировать сбои в работе. Для таких узлов очень метко введено понятие бюджета помех, в который входят помехи отражения, перекрестные помехи, резонансные колебания и др. Бюджет помех обычно



Рис. 7. Пример схемы эквивалента сети



Рис. 8. Зависимость модуля полного сопротивления эквивалента сети от частоты

определяется минимальной статической помехоустойчивостью применяемых микросхем и для КМОП-технологии считается приближенно равным половине напряжения питания. Измерение статистики помех во временной области позволяет оценить, какой вклад может вносить конкретный ЭДПТ при реализованном способе борьбы с помехами. Для мощных ЭДПТ с напряжением питания 48 В размах помех может составлять до 2–5 В пик-пик, что больше бюджета помех для многих типов логик.

Поскольку современные анализаторы спектра и сигналов всё же не позволяют анализировать шумы во временной области, то для проведения комплексного анализа целесообразно использовать осциллографы, имеющие функцию быстрого преобразования Фурье (БПФ) либо опцию анализатора спектра. Основным условием реализации анализа в частотной области на осциллографе является качество выполнения БПФ и точность получаемых результатов. Поскольку помехи ЭДПТ являются широкополосными, то результаты, полученные путем БПФ для некоторой полосы разрешения, могут быть линейно пересчитаны к полосам, предусмотренным стандартами [11, 12].

Рассмотрим пример реализации измерений кондуктивных помех ЭДПТ с использованием осциллографов Rigol MSO8204 и анализаторов спектра Rigol RSA5056-TG.



Рис. 9. Узел нормализации импеданса: а - принципиальная схема; б расчетное значение нагрузочного импеданса для помех, формируемых ЭДПТ





ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЙ ЭМИССИИ ПОМЕХ, ФОРМИРУЕМЫХ ЭДПТ

Объект исследований и схема нормализации импеданса. Для проведения измерений был выбран ЭДПТ ДК-1А. Это электродвигатель с номинальным напряжением электропитания 27 В и мощностью до 54 Вт. Номинальный ток потребления составляет 2 А, частота вращения – до 11000 об./мин. Конструкция ЭДПТ обеспечивает доступ к щеткам без его разбора.

Для проведения измерений кондуктивных ЭМП, как это было показано выше, необходимо использовать схему нормализации импеданса. Ввиду отсутствия доступного эквивалента сети была использована схема (рис. 9а), включающая две индуктивности L = 7 мГн, а также развязывающий конденсатор номиналом C = 0,1 мкФ и собственное входное сопротивление средства измерений $\mathbf{R} = 50$ Ом.

В схеме на рис. 9а источник электропитания считается имеющим по высокой частоте полное сопротивление, много меньшее сопротивления индуктивностей. Исходя из этого, кондуктивные ЭМП, формируемые ЭДПТ, нагружаются на полное сопротивление, зависящее от частоты и равное $Z(f) = (j4\pi fL(1+j2\pi fRC))/(1+j2\pi fRC-8\pi^2 LC)$, где $j = \sqrt{-1}$. На рис. 9б показана расчетная зависимость модуля импеданса для такой схемы в интервале частот от 9 кГц до 100 МГц.

При проведении измерений ЭДПТ был размещен на едином основании со схемой стабилизации импеданса (рис. 10).

Важно отметить следующее. ЭДПТ формируют импульсные помехи. Схема нормализации импеданса, в частности, эквивалент сети, включает в себя индуктивности, которые отсутствуют в реальных цепях электропитания ЭДПТ при эксплуатации. Подключение в целях снижения уровня ЭМП дополнительных емкостей, например, к щеткам ЭДПТ, способно приводить к образованию высокодобротного колебательного контура, включающего также индуктивности схемы нормализации импеданса и источник питания с низким выходным сопротивлением. Это может приводить к феноменальному росту помехоэмиссии при использовании емкостей для ее снижения. Ввиду изложенного в некоторых случаях целесообразно отказаться от использования эквивалентов сети, а уровень ЭМП контролировать посредством токовых пробников, не вносящих существенной индуктивности в цепи питания ЭДПТ.

Схемы и средства измерений. Как отмечалось выше, электромагнитные помехи могут исследоваться во временной и в частотной областях, и сигналы со схемы нормализации импеданса подавались через коаксиальную линию либо на осциллограф, либо на анализатор спектра. При исследовании во временной области использовался осциллограф Rigol MSO8204 с рабочей полосой до 2 ГГц и четырьмя каналами. Приборы Rigol серии MSO8000 – это классические осциллографы лабораторного класса с полосой пропускания до 2 ГГц. Особенностями данной серии являются сочетание высокой частоты дискретизации (до 10 Гвыб./с), большой глубины памяти объемом 0,5 млрд выборок на канал, высокой скорости



Рис. 10. Внешний вид стенда, включающего схему стабилизации импеданса и ЭДПТ

КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ

сбора данных (до 600 тыс. осциллограмм/с) и передового гибкого интерфейса пользователя. Все эти особенности удалось реализовать в этой серии за счет применения собственных разработок компании Rigol: уникальной архитектуры UltraVision II и ASIC Phoenix. Осциллографы этой серии оснащены комбинированным входным трактом, что позволяет им работать как с входным сопротивлением 1 МОм в полосе пропускания до 500 МГц, так и с 50 Ом во всей полосе пропускания осциллографа. При этом осциллограф по сравнению с анализатором спектра способен штатно измерять импульсные сигналы большей амплитуды, что позволяет даже при входном сопротивлении 50 Ом проводить измерения без использования внешнего аттенюатора. Измерения осуществлялись непосредственно по осциллограмме. Схема и фотография установки для проведения измерений во временной области показаны на рис. 11. Входное сопротивление канала осциллографа составляло 50 Ом, что необходимо не только для согласования, но и для сопоставления результатов измерений во временной и в частотной областях.

При исследовании ЭМП в частотной области использовался анализатор спектра Rigol RSA5056-TG с диапазоном рабочих частот от 9 кГц до 6,5 ГГц и полосой анализа реального времени до 40 МГц. Серия Rigol RSA5000 – это семейство цифровых анализаторов спектра реального времени с возможностью оснащения их следящим генератором и встроенным мостом для измерения коэффициента стоячей волны по напряжению, что позволяет реализовать на них одну из функций векторного анализатора цепей. Прибор выполнен в настольном формате, имеет малый вес (чуть менее 5 кг) и удобную ручку для транспортировки или перемещения. При этом он оснащен большим емкостным сенсорным цветным экраном диагональю 10,1 дюйма, что позволяет комфортно проводить измерения и фиксировать результаты исследований. Низкий уровень собственных шумов (DANL < -165 дБм) и высокая точность измерения амплитуды сигнала (погрешность менее 0,8 дБ), а также способность работать в специализированных режимах (анализатор спектра общего назначения, анализатор спектра реального времени, векторный анализатор сигналов, аналоговый демодулятор, векторный анализатор цепей и измеритель электромагнитных помех) делают его оптимальным средством измерения импульсных электромагнитных помех в частотной области.

Схема и фотография установки для проведения измерений в частотной области показаны на рис. 12. Для защиты входа анализатора спектра от возможного повреждения импульсами большой амплитуды сигнал со стенда ослаблялся аттенюатором на 20 дБ.

Электропитание ЭДПТ в схемах измерений осуществлялось от четырехканального программируемого источника R&S HMP4040 с интервалами выходных напряжений и токов 0-32 В и 0-10 А соответственно. Напряжение



Рис. 11.

Установка для исследования во временной области помех, формируемых ЭДПТ: а-схема;

б – фотография



б)

a)

на выходе устанавливалось сообразно текущим задачам измерений.

Результаты измерений помех во временной области. На рис. 13 представлены осциллограммы помех, формируемых ЭДПТ при напряжении электропитания 8 В. Длительности развертки были выбраны равными 2000 и 500 мкс. Видно, что помехи имеют разную амплитуду, что обусловлено несколько различающимся состоянием коллекторных пластин в образце ЭДПТ, а также случайными факторами. В выбранных условиях измерений размах помех может достигать единиц вольт; на рис. 136 показано, что он составляет 1,2 В. Период следования переходных процессов составляет около 2 мс. Колебательные процессы вызваны сочетанием трех описанных выше составляющих; на их случайный характер указывает не только разница в размахе, но и существенные различия в монотонности нарастания и спада.

На рис. 14 показаны такие же осциллограммы, полученные для напряжения электропитания, равного 12 В. На них видно, что амплитуда помех увеличилась до 5 В, переходные процессы сливаются друг с другом, то есть начало следующего из них наступает до завершения предыдущего. Импульсы следуют в среднем через 1 мс. Слияние импульсных переходных процессов приводит к образованию широкополосного шума импульсной природы. Представленный пример показывает уровни, которых

148 ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА | ТЕХНОЛОГИЯ | БИЗНЕС

Рис. 12.

Установка

для исследова-

Анализатор

спектра Rigol RSA5056-TG

 \wedge



Таким образом, для оценки эффективности борьбы с ЭМП ЭДПТ анализа только во временной области может оказаться недостаточно, а схемы, применяемые для измерений помехоэмиссии, могут потребовать разумной, обоснованной модификации.

Результаты исследований в частотной области были получены с использованием детектора средних значений и накопления в режиме удержания максимальных показаний, поскольку помехи ЭДПТ являют собой пример случайного процесса. На рис. 16 показана общая картина помехоэмиссии в частотной области при напряжении питания ЭДПТ, равном 12 В. Анализ спектрограммы показывает, что большая часть энергии помех сконцентрирована в диапазоне частот до 150 МГц. В данном диапазоне уровень спектральных составляющих имеет значение порядка 70 дБмкВ, что с учетом пересчета к стандартным полосам пропускания измерительных приемников [11, 12] оказывается выше типовых норм на кондуктивные помехи в соответствующих диапазонах частот. На частотах выше

ния в частотной миналом 0,1 мкФ и со области помех, переходных процесси формируемых ЭДПТ: гии помех, дополнита - схема; ми высокодобротны дит к упомянутому э

 б)
могут достигать помехи в цепях питания при их повышенной индуктивности, и определяют необходимость при-

менения описанных выше методов подавления ЭМП. Как было отмечено выше, оценка эффективности мероприятий по подавлению ЭМП ЭЛПТ с использованием

роприятий по подавлению ЭМП ЭДПТ с использованием схем нормализации импеданса, в том числе эквивалентов сети, ограничена тем, что ЭДПТ формирует импульсы тока в цепи питания, а схемы нормализации импеданса

/

Рис. 13. Осциллограммы помех, формируемых ЭДПТ, при напряжении питания 8 В и длительностях развертки: а – 2000 мкс; б – 500 мкс



Коаксиальная

линия

Стенд с ЭДПТ



Атт. 20 дБ





№5 (00236) 2024

a)





б)

Рис. 14. Осциллограммы помех, формируемых ЭДПТ, при напряжении питания 12 В и длительностях развертки: а – 2000 мкс; б – 500 мкс

150 МГц уровень отдельных спектральных составляющих превышает 58 дБмкВ, артефакты помехоэмиссии наблюдаются на частотах до 450 МГц.

В рамках проведения измерений была поставлена задача определить зависимость уровней помехоэмиссии $E_{so}(U)$ и $E_{100}(U)$ от напряжения электропитания ЭДПТ для частот 50 и 100 МГц. Для этого был получен ряд спектрограмм и использованы маркерные измерения. Примеры результатов измерений, полученных для напряжений электропитания 7, 10 и 24 В, приведены на рис. 17. Полоса обзора здесь составляла 300 МГц, время накопления – не менее 5 с. Маркер 3 был поставлен для оценки роста спектральных составляющих на частоте 200 МГц. Графики функций $E_{so}(U)$ и $E_{100}(U)$ представлены на рис. 18.

Анализ зависимостей $E_{50}(U)$ и $E_{100}(U)$, а также рис. 17 позволяют сделать следующие выводы:

- Повышение напряжения электропитания приводит к увеличению эмиссии кондуктивных ЭМП, причем в диапазоне до половины напряжения питания интенсивность помех нарастает быстрее.
- В отсутствие мер по снижению помехоэмиссии ЭДПТ формируют помехи с уровнем, существенно превосходящим нормы даже при пониженном напряжении электропитания.
- Широкополосная составляющая помехоэмиссии в диапазоне частот до 150 МГц имеет в целом небольшой разброс значений спектральной плотности – в пределах 10 дБ.

Важно обратить внимание, что эти выводы касаются не нагруженного механически образца ЭДПТ.

Исследование помех в частотной области в реальном времени также проводилось по схеме, показанной на рис. 12. Целью анализа являлось определение характера помех в килогерцовом диапазоне частот, где, как следует из рис. 13 и 14, возможно разделение узкополосных



Рис. 15. Осциллограмма помех, формируемых ЭДПТ, при напряжении питания 12 В, длительности развертки 500 мкс и подключении к щеткам емкости номиналом 0,1 мкФ



Рис. 16. Спектрограмма эмиссии кондуктивных ЭМП при напряжении электропитания ЭДПТ, равном 12 В



a)



б)



в)

Рис. 17. Спектрограммы ЭМП, формируемых ЭДПТ при напряжениях питания: а – 7 В; б – 12 В; в – 16 В

и широкополосных составляющих помехоэмиссии. Диапазон рабочих частот анализатора спектра начинается с 9 кГц, поэтому измерения проводились с некоторым отступлением от принятых правил метрологии. На рис. 19 показана спектрограмма помех ЭДПТ, полученная при напряжении электропитания 12 В. В левой части, за пределами рабочего диапазона, можно видеть подобные гармоникам составляющие, которые имеют частоты 1, 2 и 3 кГц. Это соответствует частоте повторения импульсов порядка 1 кГц (рис. 14б). Следует обратить внимание, что помехи имеют здесь уровень порядка 70–90 дБмкВ, а если их пересчитать к полосе пропускания 10 кГц, то этот диапазон должен сместиться в большую сторону на 19 дБ. Таким образом, именно в низкочастотной части диапазона оказывается актуальным использование разных способов подавления ЭМП.

На рис. 20 показаны спектрограммы реального времени, построенные для напряжений электропитания, равных 16 и 20 В. Сопоставление спектрограмм на рис. 19 и 20 позволяет сделать вывод о том, что повышение напряжения электропитания приводит к существенно более быстрому росту помехоэмиссии в диапазоне частот до 50 кГц, причем этот рост при двукратном повышении напряжения может составить 15–20 дБ.

Оценка влияния емкости на подавление широкополосной составляющей помех. На рис. 21 для сопоставления приведены спектрограммы, полученные для напряжения питания 16 В с включением емкости номиналом 0,1 мкФ между щетками ЭДПТ и без такового. Цена деления по оси частот составляет 5 МГц. Для указанных случаев отсчет по маркеру дает значения 32,9 и 38,7 дБмкВ, что с учетом ослабления аттенюатором соответствует значениям 52,9 и 58,7 дБмкВ. Таким образом, подключение конденсатора к щеткам ЭДПТ приводит в данном случае к снижению эмиссии широкополосных помех на 5,8 дБ. Этот пример показывает, что емкости и другие средства подавления ЭМП следует подбирать индивидуально к каждому их источнику, и при этом желательно знать его характеристики помехоэмиссии.

Таким образом, мы рассмотрели общий порядок проведения измерений помех ЭДПТ во временной и в частотной областях.



Рис. 18. Зависимости E₅₀(U) и E₁₀₀(U) для ЭДПТ ДК-1А



Рис. 19. Спектрограмма ЭМП ЭДПТ в реальном времени, полученная при напряжении питания 12 В

0000

Как следует из изложенного, формирование ЭМП ЭДПТ имеет свою уникальную специфику, не свойственную никаким другим источникам помех. Характер помехоэмиссии является индивидуальной чертой ЭДПТ, он трудно прогнозируем, хотя все машины постоянного тока в целом построены по одному и тому же базовому принципу. При этом ЭДПТ свойственна большая амплитуда импульсных помех, способная вызвать нарушения информационной целостности аналоговых и цифровых сигналов.

К настоящему времени экспериментальные исследования помех ЭДПТ и эффективности их подавления являются, по сути, единственным источником достоверной информации о помеховой обстановке, которая будет сопутствовать работе ЭДПТ и других потребителей электрической энергии, подключенных к тем же точкам. При осуществлении таких исследований первостепенную важность приобретает качество средств измерений. Осциллографы Rigol серии MSO8000 и анализаторы спектра Rigol серии RSA5000 хорошо справляются с задачами анализа помехоэмиссии, в том числе при нестационарном характере ЭМП. Наличие режима реального времени у анализатора спектра позволяет идентифицировать и локализовать редко повторяющиеся помехи, а наличие в приборе полос разрешения, соответствующих стандартам по ЭМС, дает возможность сопоставлять уровень кондуктивных помех с нормами без пересчета.

ЛИТЕРАТУРА

- Лемешко Н.В. Теоретические основы моделирования сертификационных испытаний радиоэлектронных средств по эмиссии излучаемых радиопомех. М.: МИЭМ, 2012. 196 с.
- ГОСТ Р 51319-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения индустриальных радиопомех. Технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2000. 57 с.



a)



б)

Рис. 20. Спектрограммы помех, формируемых ЭДПТ, в диапазоне частот до 50 кГц при напряжениях питания: а – 16 В; б – 20 В



Рис. 21. Спектрограммы помех, формируемых ЭДПТ при напряжении электропитания 16 В: а – при подключенной к щеткам емкости номиналом 0,1 мкФ; б – без таковой

12. ГОСТ Р 51318.16.1.1-2007. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров индустриальных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-1. Аппаратура для измерения параметров индустриальных радиопомех и помехоустойчивости. Приборы для измерения индустриальных радиопомех. М.: Стандартинформ, 2008. 58 с.