

РАЗРАБОТКА ОПИСАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЭМИССИИ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Н.В. Лемешко, зам. нач. отдела АО «Корпорация «Комета», д-р техн. наук,
nlem83@mail.ru

В.Н. Захаров, студент НИУ «Высшая школа экономики», *volodzakharov3@gmail.com*

Рецензент: С.В. Стрельников, АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», д-р техн. наук, *orionsys@mail.ru*

В статье предлагается описательная модель эмиссии кондуктивных помех, формируемых коллекторными электродвигателями постоянного тока. Проанализированы особенности формирования таких помех, определены требования к описательной модели на основе четырех констант. Предложен алгоритм идентификации параметров модели на основе экспериментальных данных. Для двух образцов электродвигателей представлены примеры определения параметров предложенной модели и оценки ее погрешностей.

Ключевые слова: кондуктивная помеха, электродвигатель постоянного тока, коллектор, описательная модель.

DEVELOPMENT OF A DESCRIPTIVE MODEL FOR THE OCCURRENCE OF CONDUCTIVE INTERFERENCE IN COLLECTOR ELECTRIC MOTORS BASED ON THE RESULTS OF MEASUREMENTS IN THE FREQUENCY DOMAIN

N.V. Lemeshko, Deputy Head of Department, JSC «Kometa Corporation», Ph.D.,
nlem83@mail.ru

V.N. Zakharov, Student, NRU «Higher School of Economics», *volodzakharov3@gmail.com*

The article offers a descriptive model of the emission of conductive interference generated by collector DC electric motors. The features of the formation of such interference are analyzed, and the requirements for a descriptive model based on four constants are determined. An algorithm for identifying model parameters based on experimental data is proposed. Examples of determining the parameters of the proposed model and estimating its errors are presented for two samples of electric motors.

Keywords: conductive interference, DC electric motor, collector, descriptive model.

Введение

В настоящее время обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) электронных устройств (ЭУ) признано одной из основных проблем их проектирования. Наиболее пристальное внимание в этом смысле уделяется ЭМС на внутриаппаратном и внутрисистемном уровнях, от соблюдения условий которой зависят работоспособность и стабильность работы ЭУ в целом.

Широкое применение интегральной электронной компонентной базы (ЭКБ), изготавливаемой по все меньшим технологическим нормам, усугубляет проблему внутриаппаратной ЭМС. Это наряду со снижением напряжения электропитания обусловлено повышением быстродействия компонентов, в результате чего при прочих равных условиях снижаются как энергетика, так и длительность импульсных помех, вызывающих отклик в цифровых ЭУ в виде сбоев и искажения информации.

Практика показала, что понятие электромагнитной обстановки (ЭМО) [1, с. 3], широко используемое в сфере межсистемной ЭМС, может и должно применяться для ЭКБ, чувствительной к кондуктивным помехам. Соответственно, можно говорить о той или иной степени напряженности ЭМО для такой ЭКБ и о направлении ее изменения в категориях ухудшения или улучшения.

Обеспечение приемлемой ЭМО для чувствительной ЭКБ является инженерно-конструкторской задачей, которая должна решаться комплексно и экономически целесообразно. Для выработки мер по ограничению распространения кондуктивных помех необходимо иметь оценку их уровней. К широко распространенным источникам кондуктивных помех относятся коллекторные электродвигатели постоянного тока (ЭДПТ). Они используются в составе приводов и исполнительных механизмов, в системах принудительного охлаждения и т.д. Во многих случаях можно считать, что ЭДПТ работают в малонагруженном режиме, близком к холостому ходу. Особенностью ЭДПТ является возможность управления их производительностью путем либо изменения питающего напряжения, либо применения широтно-импульсной модуляции [2, с. 24; 3, с. 59].

Формируемая ЭДПТ электромагнитная обстановка в конкретных точках ЭУ будет зависеть как от частоты, так и от напряжения питания. При этом амплитуда импульсов таких помех достигает единиц вольт, и они могут стать причиной периодически проявляющихся или постоянных сбоев, например в цифровых устройствах. Из изложенного следует, что для обоснованного применения мер по снижению уровня помех и нормализации ЭМО для чувствительных элементов необходимо создать и использовать модель кондуктивных помех ЭДПТ, которая учитывала бы названные факторы. Такая модель предлагается в настоящей статье и является примером реализации инновационных подходов в сфере обеспечения электромагнитной совместимости.

Причины формирования кондуктивных помех коллекторными ЭДПТ

Основной причиной формирования помех ЭДПТ является наличие скользящего контакта между щетками и пластинами коллектора при одновременном наличии достаточно большой индуктивности у обмоток статора и якоря. Щетки изготавливают прессованием графитного либо угольного порошка, причем для снижения электрического сопротивления и повышения стойкости к износу в него добавляют мелкодисперсный медный порошок, полученный электролизом. Исходя из соображений прочности, долговечности и нагревостойкости, щетки для ЭДПТ невозможно сделать слишком тонкими – например, менее ширины пластины коллектора. Неравномерность протекания тока через щеточно-коллекторные переходы в ЭДПТ и является причиной появления кондуктивных помех.

В результате анализа типовой конструкции щеточно-коллекторного узла (рис. 1) можно выделить три причины возникновения электромагнитных помех в ЭДПТ.

1. Искрение при трении щеток о пластины коллектора имеет ту же природу, что и для любого другого скользящего контакта. Через щетки должен протекать постоянный ток, однако его значение претерпевает хаотичные колебания за счет изменения электрического сопротивления при угловом смещении якоря. В местах большего сопротивления повышается падение напряжения, возникает локальный нагрев, приводящий к искрению.

Интенсивность помех, вызванных трением щеток о пластины коллектора, а также их спектральный состав зависят от скорости вращения и тока в обмотках якоря, степени износа щеток и силы их прижатия к коллекторным пластинам.

2. Колебания потребления тока при подключении/отключении обмоток якоря указываются в литературе, например в [4, с. 28], как одна из основных причин формирования помех в 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. Индуктивность сориентированных в направлении полюсов индуктора обмоток, подключенных к источнику питания через контактные пластины коллектора, оказывается значительной. Это приводит к тому, что при подключении очередной обмотки якоря к щеткам ток через нее хоть формально и нарастает по экспоненциальному закону, но к моменту времени отключения обмотки не успевает увеличиться до потенциального максимума и в целом изменяется практически линейно. При отключении обмотки 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 будут иметь пилообразную форму.



Рис. 1. Типовая конструкция щеточно-коллекторного узла ЭДПТ

На рис. 2 коллекторные пластины в количестве $k = 24$ шт. изображены с шагом 15° и с осевой симметрией, щетки расположены симметрично. Поэтому в упрощенном представлении описанные коммутационные процессы происходят синхронно для обеих щеток, соответственно за один оборот коллектора их количество составит k . Если электродвигатель обеспечивает скорость вращения якоря N об/с, то тогда частота изменения тока составит $F = kN$. Если коллектор имеет 24 пластины и частота вращения якоря составляет 50 об/с, то для ЭДПТ типовой конструкции частота F составит 1200 Гц. Существуют машины постоянного тока [5, с. 46], в которых в целях достижения специальных характеристик используются чередующиеся полюсы индукторов в четном количестве, а также большее количество щеток. Для таких ЭДПТ подсчет частоты коммутационных импульсов тока должен осуществляться с учетом конструктивных особенностей.

3. 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. После появления воздушного зазора между пластиной коллектора и щеткой эта индуктивность развивает на нем напряжение, достаточное для пробоя. Его возникновению способствует также разогрев щеток и пластин коллектора. Пробой, вызванный индукционным перенапряжением, имеет другую природу в сравнении с искрением в области скольжения пластин коллектора по щеткам. Он отличается большим напряжением и не переходит в дугу.

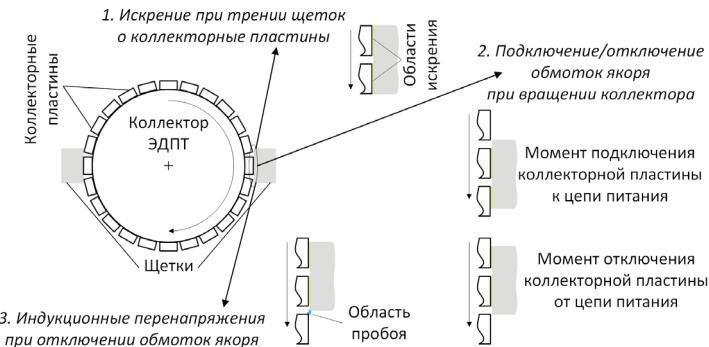


Рис. 2. Три механизма возникновения ЭМП в щеточно-коллекторном узле ЭДПТ

Интенсивность эмиссии кондуктивных помех определяется мощностью электродвигателя, током в обмотках якоря, техническим состоянием ЭДПТ, а также скоростью вращения якоря. Процесс их формирования следует рассматривать как следствие сочетания случайных факторов. Коллекторные ЭДПТ создают широкополосные и узкополосные составляющие ЭМП. Причины их появления тесно переплетены, и разделить эти составляющие даже при использовании современных средств измерений не всегда удается. Для типовых скоростей вращения якоря ЭДПТ узкополосные составляющие лежат в диапазоне частот до 5 кГц, что можно наблюдать при анализе спектра в реальном времени [6, с. 107]. Однако, в сфере внутриаппаратной ЭМС помехи на частотах ниже 9 кГц обычно не рассматриваются.

Требования к описательной модели кондуктивных помех ЭДПТ и условия ее построения

Вопрос формализации описания эмиссии как кондуктивных, так и излучаемых помех до настоящего времени был решен лишь в малой степени, что определяется слишком широким разнообразием существующих ЭУ. Наиболее универсальными в этом отношении являются:

- спектрограммы помех, полученные в регламентированных условиях и при заданных настройках средств измерений, позволяющие формулировать выводы о максимальной спектральной плотности помех в диапазоне измеряемых частот;
- осциллограммы помех, полученные в режиме послесвечения и при обоснованно выбранных условиях синхронизации, позволяющие для конкретных условий измерений получить информацию об амплитуде и максимальной электрической площади импульсных помех, во многих случаях определяющей течение вызванных ими переходных процессов;
- статистические распределения импульсных помех, построенные в категориях амплитуд, длительностей импульсов и плотности вероятностей, дающие возможность декомпозировать картину помехоэмиссии, например, для идентификации источников помех.

Анализ помехоэмиссии обычно осуществляется в частотной области и с накоплением, а нормы помехоэмиссии задаются в категориях мощности помех для регламентированных условий измерений и являются общими для однотипных ЭУ. Анализ помех во временной области существенно ограничен в силу специфики измерительной задачи.

Ввиду изложенного будем строить описательную модель помехоэмиссии (ОМП) как зависимость спектральной плотности помех от частоты анализа и напряжения электропитания и в форме значений, не превышаемых помехоэмиссией. Такой подход хорошо себя зарекомендовал в области межсистемной ЭМС [6, с. 106; 7, с. 83]. К описательной модели можно предъявить следующие требования.

1. Она должна учитывать зависимость помехоэмиссии от напряжения электропитания и от частоты анализа. Диапазон адекватности модели должен включать все напряжения электропитания ЭДПТ, вплоть до номинального, при которых якорь ЭДПТ уверенно вращается. Считается, что полоса частот помехоэмиссии, обусловленной этим фактором, может простираться до 300 МГц [8, с. 190].

2. Нулевому значению напряжения электропитания должен для всех частот соответствовать нулевой уровень помехоэмиссии.

3. Модель должна строиться на основе результатов прямых измерений, условия проведения которых являются неотъемлемой частью границы адекватности модели.

4. Модель должна иметь предельно простую математическую форму.

5. Модель должна соответствовать требованиям по погрешности оценки уровня помехоэмиссии, характерным для современных средств измерений. В настоящее время типовая амплитудная погрешность для анализаторов спектра (АС) и для эквивалентов сети (ЭС) составляет 0,5 и 1,0 дБ соответственно. Общую погрешность измерений можно оценить на уровне 1,8 дБ, если учитывать их рассогласование с коаксиальной линией. Вместе с тем, для упомянутой выше аналогии по построению гарантированных диаграмм антенн принят подход [7, с. 85], состоящий в том, что уровни, заданные ДН, повышают на 2...5 дБ в зависимости от предполагаемого разброса характеристик антенн заданного типа. Ввиду этого, можно считать, что для рассматриваемой модели допустимо разумное смещение математического ожидания погрешности аппроксимации в область положительных значений.

Исходя из этих требований, а также базируясь на изложенных ниже результатах исследований, была выбрана следующая форма описательной модели кондуктивных помех коллекторных ЭДПТ:

$$E(f, U) = A(f) U^{B(f)}, \quad (1)$$

где $E(f, U)$ — уровень кондуктивных помех, мкВ, для напряжения питания ЭДПТ U , В, и частоты наблюдения f , Гц; $A(f) = cf^d$; $B(f) = ef^g$; c, d, e, g — коэффициенты, индивидуальные для каждого ЭДПТ, которые в контексте решаемой задачи будем считать безразмерными. Их определение должно осуществляться на основе массива полученных экспериментальных данных. При необходимости оценочные значения помехоэмиссии могут быть легко пересчитаны к логарифмической шкале.

Принципы получения экспериментальных данных для построения описательной модели кондуктивных помех ЭДПТ

Подход к получению экспериментальных данных, изложенный ниже, применим к любым ЭДПТ и основывается на классических измерениях эмиссии кондуктивных помех, проводимых в соответствии с [9, с. 3; 10, с. 3]. Основная сложность здесь состоит в том, что источник электропитания ЭДПТ имеет свое собственное внутреннее сопротивление, которое оказывает влияние на показания АС либо измерительного приемника. Для устранения такого влияния принято использовать ЭС, главной функцией которых является нормализация нагрузочного импеданса для помех, формируемый измеряемым объектом. Пример схемы ЭС, широко применяемой в зарубежных стандартах, представлен на рис. 3. Главными элементами, определяющими полное сопротивление эквивалента сети, являются входное сопротивление измерительного прибора, катушка индуктивности 50 мГн и резистор сопротивлением 5 Ом. Остальные элементы схемы образуют фильтр верхних частот с частотой среза ниже 9 кГц и обеспечивают развязку испытуемого оборудования от сети электропитания. При измерениях кондуктивных помех, формируемых ЭДПТ, можно использовать стандартные ЭС, однако их схемы будут являться в некоторой степени избыточными.

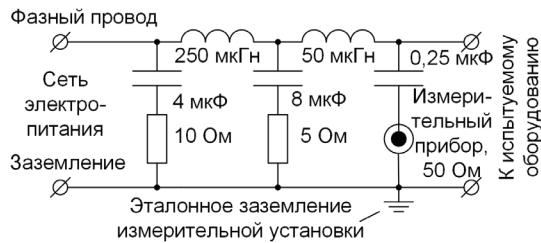


Рис. 3. Пример схемы эквивалента сети

При испытаниях ЭДПТ используется источник постоянного тока, имеющий на выходе собственный фильтр и одновременно низкое выходное сопротивление. Это позволяет несколько упростить схему нормализации импеданса (СНИ), пример которой показан на рис. 4а. Кроме того, в ряде случаев характеристики ЭС нормируются в полосе частот до 30 МГц, что является недостаточным для анализа помехоэмиссии ЭДПТ. Это еще один аргумент в пользу применения альтернативных упрощенных схем. При необходимости СНИ могут быть подвергнуты калибровке на разных частотах. Известно [8, с. 126], что в схемах ЭС на частотах выше 20 МГц в них могут наблюдаться резонансные явления, поэтому для элементов СНИ должны предприниматься меры по минимизации паразитных емкостей и индуктивности.

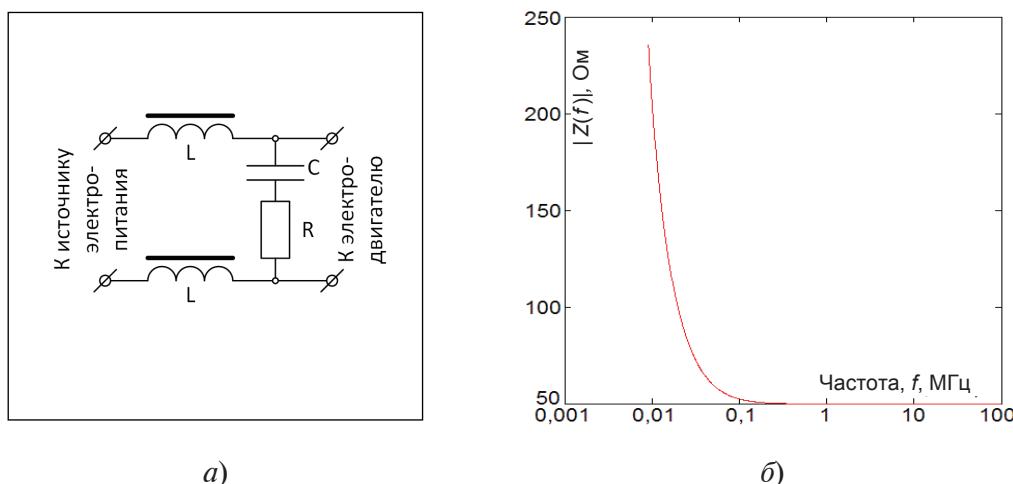


Рис. 4. Цепь нормализации импеданса:
а) принципиальная схема; б) расчетное значение нагрузочного импеданса для помех, формируемых ЭДПТ

Анализируемые помехи с соответствующего выхода СНИ по коаксиальной линии подаются на АС для осуществления прямых измерений, причем характеристики СНИ и настройки АС будут являться неотъемлемой частью модели кондуктивной помехоэмиссии, поскольку она строится для конкретных условий получения экспериментальных данных. Наиболее важными настройками АС будут полоса разрешения RBW , количество шагов по частоте N в полосе обзора, тип используемого детектора и характер накопления. Полосу разрешения RBW для обеспечения надлежащей детальности отображения спектрограмм целесообразно задавать исходя из соотношения $SPAN/RBW > 200$, где $SPAN$ – полоса обзора АС, устанавливаемая сообразно характеру эмиссии кондуктивных помех. Параметр N

определяет количество точек, в которых АС определяет уровень сигналов за один цикл развертки, причем в типовых случаях $N = 301$ или 625 шт., что определяется свойствами экрана АС. Для АС высшего класса при считывании данных во внешние устройства значение N может задаваться вплоть до 30 тыс. точек и более. Применительно к задаче анализа широкополосной эмиссии достаточно выполнения условия $N > 300$, что позволит получить должную детализацию спектрограмм при существенных отличиях спектральной плотности по частоте.

Для измерений кондуктивных помех стандарты [11, с. 17] предписывают использовать детекторы средних и квазипиковых значений, в которых установлены соответствующие нормы помехоэмиссии. Но в зависимости от целей измерений могут использоваться и детекторы других типов, например, среднеквадратических значений. При построении спектрограмм следует использовать режим удержания максимума. Собственно, измерения сводятся к наблюдению спектрограмм на экране и к сохранению результатов для последующей математической обработки.

Несмотря на то, что в формуле (1) имеется только четыре параметра, изменение уровня эмиссии кондуктивных помех может происходить весьма неравномерно при изменении как частоты, так и напряжения. Ввиду этого целесообразно снимать спектрограммы с небольшим шагом по напряжению. Проведенные эксперименты показали, что для ЭДПТ с номинальным напряжением питания 27 В измерения надо проводить с шагом не более 2 В, начиная с напряжения $8\ldots12$ В.

Примеры получения экспериментальных данных для определения параметров модели кондуктивных помех

Для получения экспериментальных данных использовалась наиболее простая схема эквивалента сети (см. рис. 4а), в которой нагрузочный импеданс для кондуктивных помех создается разделительной емкостью $C = 0,1$ мкФ, входным сопротивлением АС $R = 50$ Ом и двумя одинаковыми индуктивностями $L_1 = L_2 = 7$ мГн, выполненными на ферритовых магнитопроводах. В схеме на рис. 4а 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

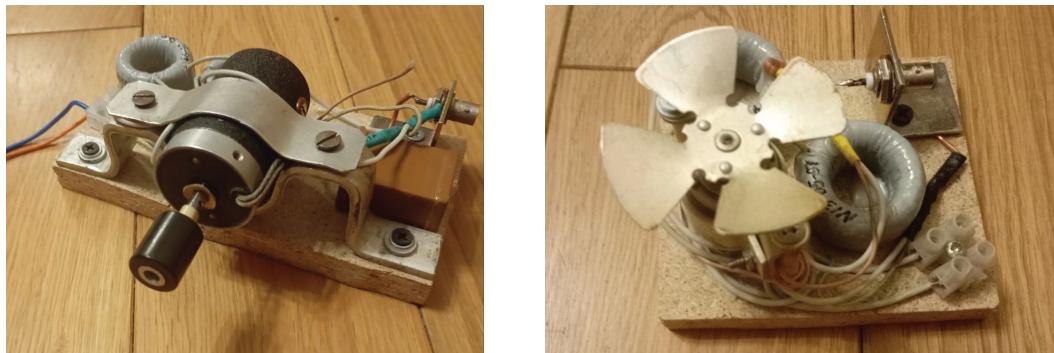
$$Z(f) = \frac{j4\pi fL(1+j2\pi fRC)}{1+j2\pi fRC-8\pi^2 LC},$$

где $j = \sqrt{-1}$.

На рис. 4б показана расчетная зависимость модуля импеданса для такой схемы в интервале частот от 9 кГц до 100 МГц, не учитывающая изменение индуктивностей с ростом частоты. Резонансная частота такой схемы составляла около 6 кГц, т. е. лежала вне границ диапазона А по классификации CISPR.

Для осуществления измерений были собраны стенды, на которых ЭДПТ размещались вместе со схемами нормализации импеданса (рис. 5). В качестве объектов исследования были выбраны коллекторные ЭДПТ марок ДК-1А и ДПМ-25-Н1-07 с номинальным напряжениями питания 27 В. Они работали в режиме, близком к холостому ходу.

Для получения экспериментальных данных о помехоэмиссии кондуктивных помех ЭДПТ необходимо использовать установку, включающую анализатор спектра и источник вторичного электропитания постоянного тока с регулируемым выходным напряжением, который выбирается сообразно типу ЭДПТ. Частотный диапазон измерений кондуктивных помех выбирается для каждого ЭДПТ индивидуально на основе наблюдения за картиной помехоэмиссии.

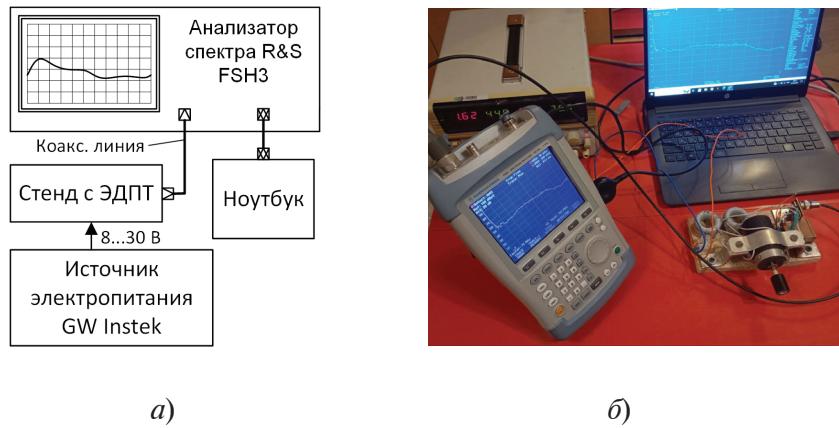


a)

б)

Рис. 5. Стенды для проведения измерений с ЭДПТ марки:
а) ДК-1А; б) ДПМ-25-Н1-07

На рис. 6 показаны схема и фотография установки, использовавшейся для получения экспериментальных данных для обоих стендов. Она включала источник электропитания фирмы GW Insteek, анализатор спектра R&S FSH3 и ноутбук для документирования результатов измерений.



a)

б)

Рис. 6. Измерительная установка:
а) схема; б) фотография

На рис. 7 и 8 показаны примеры спектрограмм кондуктивных помех, снятых для обоих образцов ЭДПТ при напряжениях питания 12 и 30 В. Спектрограммы были получены в диапазоне частот от 0 до 80 МГц для полосы разрешения, равной 30 кГц. Измерения проводились в 301 точке, в режиме удержания максимума, с накоплением не менее 20 с. С учетом широкополосности формируемых ЭДПТ помех результаты измерений могут быть линейно пересчитаны к полосам, определяемым стандартами [9, с. 3; 10, с. 3]. Спектрограммы, подобные показанным на рис. 7 и 8, были получены для интервалов напряжений 8...30 В с шагом 2 В.

После осуществления измерений были подготовлены файлы с исходными данными для обработки, включающие матрицы с числом строк и столбцов, соответствующим количеству частотных точек и шагов по напряжению питания при измерениях.

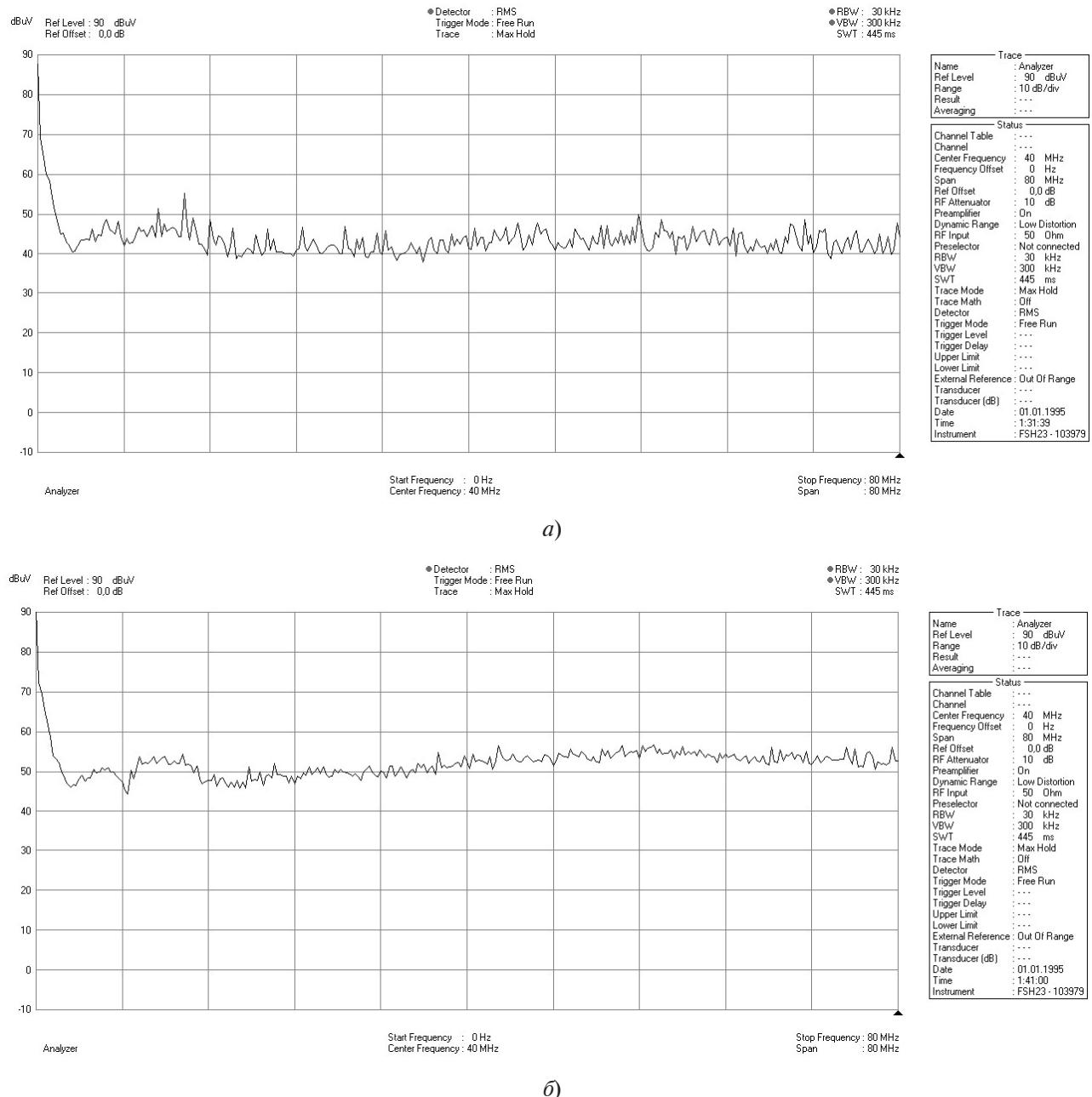


Рис. 7. Примеры спектрограмм помех ЭДПТ ДК-1А при напряжении питания: а) 12 В; б) 30 В

Алгоритм обработки результатов измерений

При выработке алгоритма обработки необходимо учитывать, что полученные для каждого напряжения значения могут иметь разброс до 6...7 дБ между смежными частотами измерений. Это будет наблюдаться даже в случае измерений с удержанием максимума, поскольку фактическая картина помехоэмиссии для ЭДПТ обусловлена совокупностью существенно различающихся по своей природе факторов. Ввиду этого алгоритм обработки результатов измерений в целях определения значений коэффициентов c, d, e, g в уравнении (1) должен

предусматривать операцию усреднения. Это в особенности важно, так как в нем используется степенная функция с существенной зависимостью от изменения показателя степени.

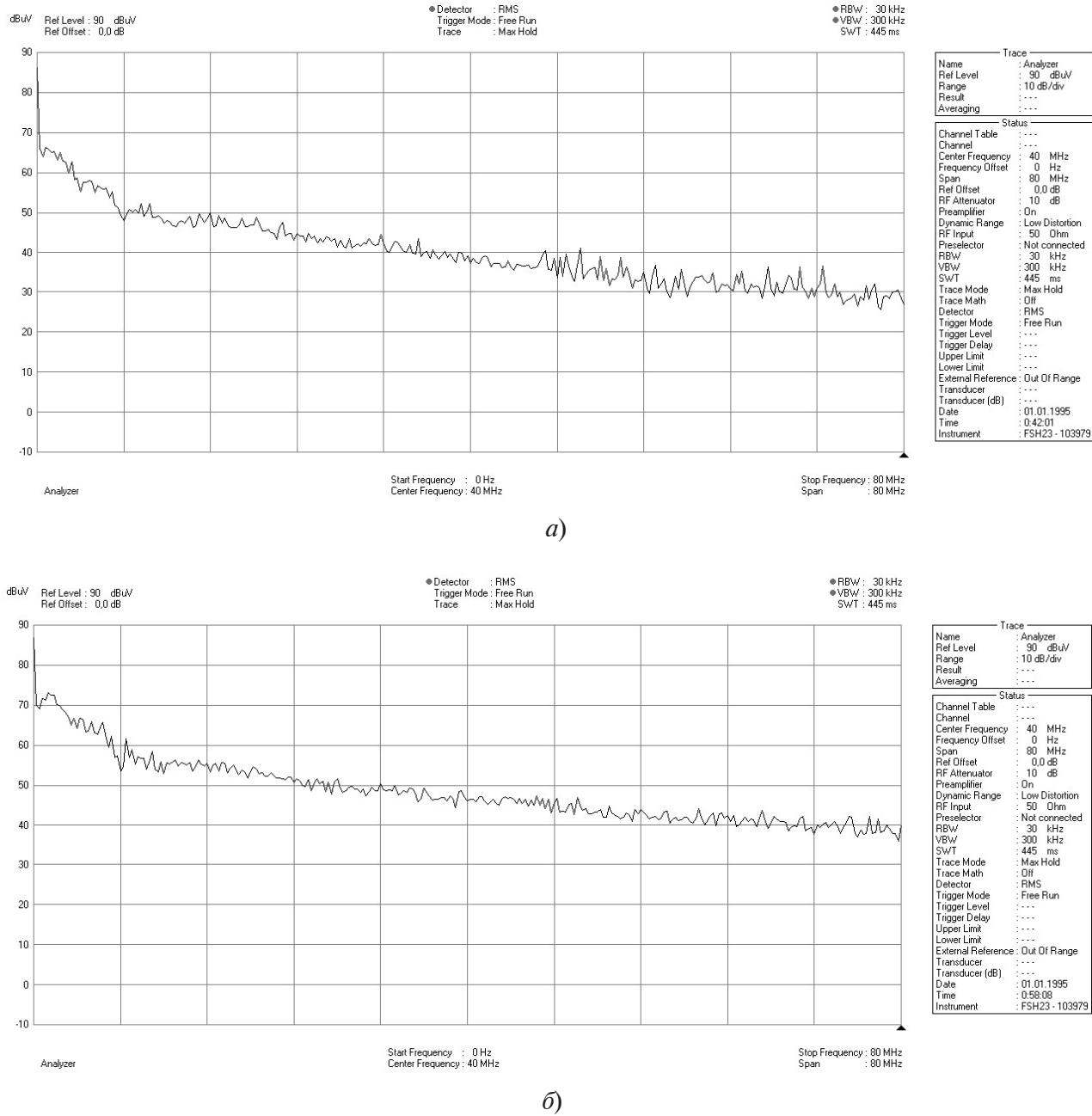


Рис. 8. Примеры спектрограмм помех ЭДПТ ДПМ-25-Н1-07 при напряжении питания: а) 12 В; б) 30 В

Для выполнения математической обработки предлагается алгоритм, схема которого показана на рис. 9. Исходно данные сохранения спектрограмм находятся в разных файлах, поскольку сопоставлены измерениям при разном напряжении электропитания ЭДПТ. Поэтому вначале необходимо подготовить массив M исходных данных для обработки в виде

таблицы, в которой первый столбец и первая строка включают значения частот и напряжений электропитания, для которых были проведены измерения. Остальные элементы массива – это измеренные значения уровня помех $E_{изм}(U,f)$ в дБмкВ. Поскольку модель (1) строится для абсолютных значений уровня помех, то далее осуществляется их пересчет к линейным единицам и формируется массив M' .

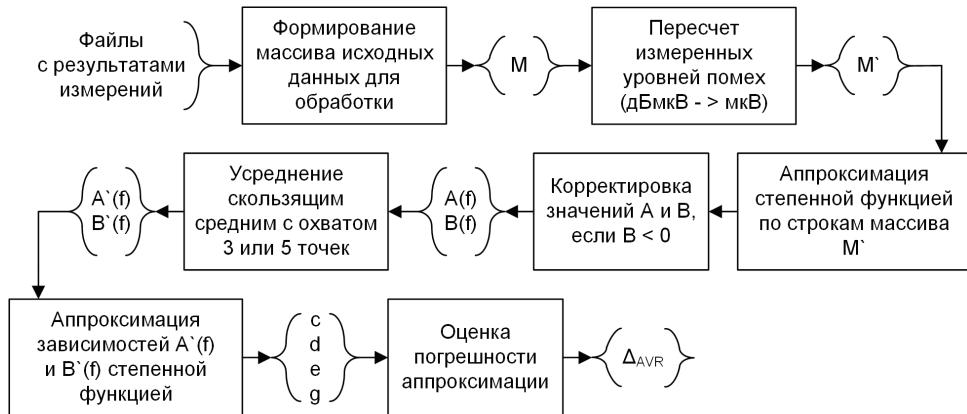


Рис. 9. Схема алгоритма обработки результатов измерений для получения характеристик модели и оценки ее погрешности

Для функций $A(f)$ и $B(f)$ выбрана степенная форма. Согласно [12, с. 153], аппроксимация степенной функцией может быть реализована на основе логарифмического ее представления, при котором она переходит в линейную зависимость. На основе применения такого подхода к каждой строке массива M' , сопоставленной напряжениям электропитания, определяются значения коэффициентов A и B , которые для каждой частоты наилучшим образом приближают к измеренным значениям уровня помех функцию (1). Таким образом, формируются вектор-столбцы A и B , элементы которых сопоставлены с частотами измерений f , т.е. таблично заданные функции $A(f)$ и $B(f)$. Для ЭДПТ с ростом U уровень помех $E_{изм}$ растет, однако результаты измерений для разных значений U имеют для отдельно взятой частоты случайный характер. Ввиду этого в редких случаях аппроксимация может давать значения $B < 0$ при аномально большом значении A . Такие значения вектор-столбцов A и B заменяются на средние, рассчитанные для смежных частот измерений.

Далее для вектор-столбцов A и B реализуется усреднение скользящим средним с охватом 3 или 5 точек, что позволяет получить более сглаженные данные A' и B' для второй аппроксимации, реализуемой по тому же методу. В результате рассчитываются значения коэффициентов c, d, e, g как основной результат работы алгоритма.

Учитывая специфику решаемой задачи и ее невысокую вычислительную сложность, целесообразно предусмотреть и расчет погрешностей аппроксимации, принимая за истинные значения результаты эксперимента, пересчитанные в мкВ. При этом интерес представляет значение средней погрешности Δ_{AVR} , а при достаточном объеме исходных данных может быть построено и распределение погрешностей. Значения погрешностей для рассматриваемой задачи целесообразно выразить в дБ.

Представленный алгоритм является отправной точкой для его возможной программной реализации.

Результаты реализации алгоритма для экспериментально полученных данных

Для реализации и отработки алгоритма использовалась система MathCAD. Экспериментально полученные данные были сведены в файлы Excel для каждого из двух стендов, при их чтении формировался массив M . На рис. 10 представлены результаты расчета зависимостей $A(f)$ и $B(f)$ для ЭДПТ ДК-1А и применения к ним усреднения скользящим средним с охватом $k = 5$. Указанные зависимости из-за случайного характера формирования помехоэмиссии имеют существенно изрезанный характер, что и обуславливает необходимость применения усреднения. Характер функций $A(f)$ и $A'(f)$ свидетельствует о том, что по результатам второй аппроксимации значение $d < 0$.

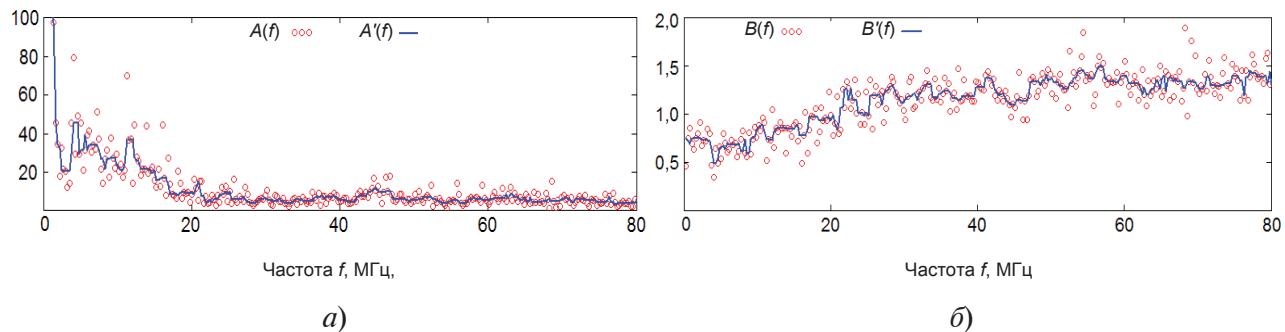


Рис. 10. Зависимости, полученные для ЭДПТ ДК-1А по результатам обработки экспериментальных данных: *a*) $A(f)$ и $A'(f)$; *б*) $B(f)$ и $B'(f)$

Применение аппроксимации к функциям $A'(f)$ и $B'(f)$ дает значения $c = 9,95 \cdot 10^5$; $d = -0,647$; $e = 0,018$; $g = 0,24$. На рис. 11 для примера представлены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений помехоэмиссии на частоте 64,27 МГц, которые качественно отражают точность полученной аппроксимации.

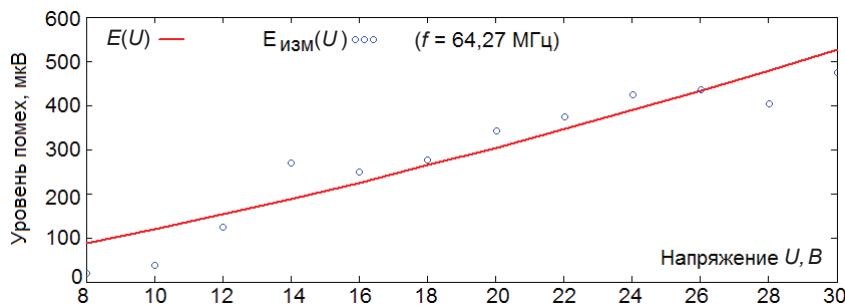


Рис. 11. Сопоставление расчетных и измеренных значений помехоэмиссии для ЭДПТ ДК-1А на частоте 64,27 МГц

Использование аппроксимации экспериментальных данных требует оценки ее точности. График распределения погрешностей, представленный на рис. 12, построен в категориях сопоставления количества измерений N и погрешностей Δ . Здесь использовались считавшиеся истинными значения $E_{\text{изм}}(U, f)$ для всех частот и напряжений, охваченных измерениями (всего 3600 точек). График построен с шагом 0,1 дБ.

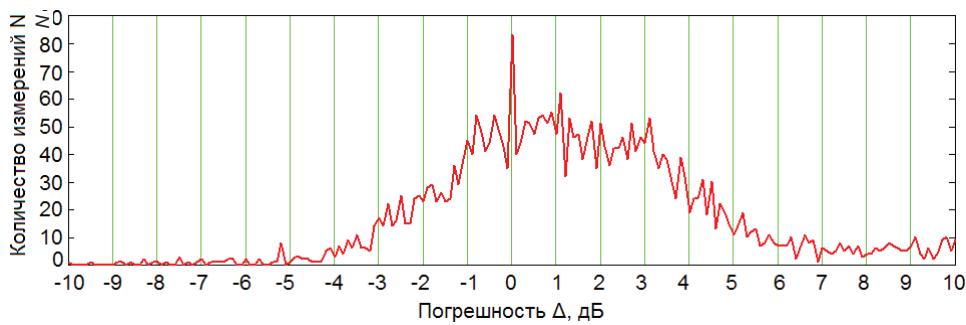


Рис. 12. График распределения погрешностей аппроксимации, построенный по результатам измерений помехоэмиссии ЭДПТ ДК-1А

Значение средней погрешности составляет $\Delta_{AVR} = 1,8$ дБ, средней по модулю – 3 дБ. Как видно, математическое ожидание погрешности не равно нулю, и расчетные значения погрешности в среднем оказываются чуть больше, чем измеренные. Вероятность появления погрешностей вне интервала $-3\dots+5$ дБ составляет не более 5%. Таким образом, представленную аппроксимацию следует признать по точности вполне удовлетворительной, она вполне соотносится с погрешностью средств измерений, оцененной выше.

На рис. 13–15 представлены аналогичные графики, полученные по результатам измерений для ЭДПТ ДПМ-25-Н1-07 с применением того же алгоритма. Расчетные значения параметров модели составляют $c = 1,44 \cdot 10^6$; $d = -0,645$; $e = 0,101$; $g = 0,115$. Характеристики погрешности аппроксимации в данном случае оказываются заметно больше. Значение средней погрешности составляет $\Delta_{AVR} = 1,6$ дБ, средней по модулю – 4,8 дБ. Вероятность появления погрешностей вне интервала $-4\dots+6$ дБ составляет не более 25%, что с учетом специфики решаемой задачи можно рассматривать как удовлетворительный результат. Снижение погрешностей аппроксимации может быть достигнуто корректировкой коэффициентов в небольших интервалах относительно найденных значений.

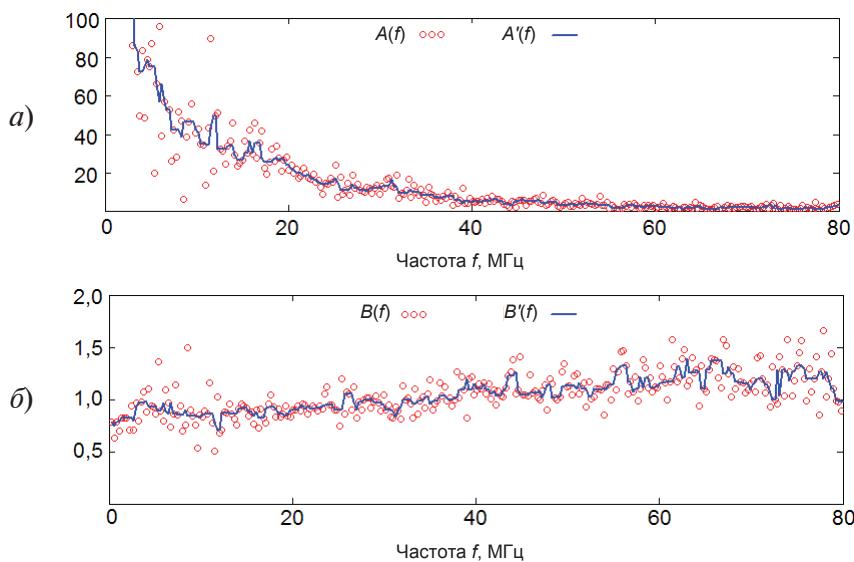


Рис. 13. Зависимости, полученные для ЭДПТ ДПМ-25-Н1-07 по результатам обработки экспериментальных данных: а) $A(f)$ и $A'(f)$; б) $B(f)$ и $B'(f)$

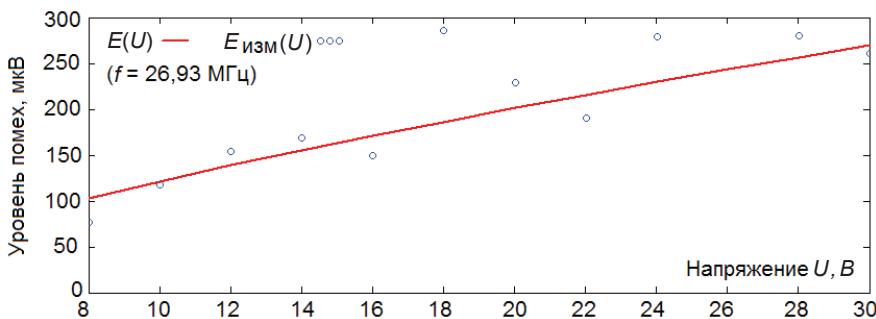


Рис. 14. Сопоставление расчетных и измеренных значений помехоэмиссии для ЭДПТ ДПМ-25-Н1-07 на частоте 26,93 МГц



Рис. 15. График распределения погрешностей аппроксимации, построенный по результатам измерений помехоэмиссии ЭДПТ ДПМ-25-Н1-07

Представленные примеры идентификации параметров и расчета погрешностей аппроксимации в целом говорят об эффективности предложенной описательной модели эмиссии кондуктивных помех ЭДПТ. Для определения среднестатистического значения погрешности для такого метода описания помех требуется, очевидно, исследовать большее количество коллекторных ЭДПТ разных конструкций.

Заключение

Таким образом, предложенная форма описания помехоэмиссии для коллекторных ЭДПТ может быть сведена фактически к четырем параметрам, соответствующим заданным условиям измерений. Для описания эмиссии кондуктивных помех для коллекторных ЭДПТ могут быть предложены и другие формы моделей с иными принципами идентификации параметров.

В дальнейшем алгоритм расчета параметров модели может быть усовершенствован с использованием, например, следующего подхода. Значения c , d , e , g , найденные по схеме на рис. 9, можно рассматривать как их первое приближение. Далее они уточняются на основе либо анализа, либо функций чувствительности по каждому из параметров, либо эволюции распределения погрешностей. Предварительный анализ показывает, что наилучшее приближение может быть достигнуто при варьировании параметров модели в пределах $\pm 15\%$. Для осуществления такой оптимизации необходимо использовать строго формализованные математические критерии.

Также нельзя не сказать о проблеме применимости в инженерном деле результатов измерений кондуктивных помех по методикам, выработанным в сфере ЭМС. Выполнение предписаний стандартов по измерениям помехоэмиссии ориентировано на обеспечение повторяемости и воспроизводимости результатов измерений, в том числе для их сопоставления с нормами помехоэмиссии. При этом используются схемы нормализации нагрузочного импеданса – эквиваленты сети. Однако применение источников помехоэмиссии типа ЭДПТ сопровождается иными его значениями, определяемыми частотными свойствами питающей электросети. При проектировании устройств пересчет измеренных уровней помех к фактическим условиям эксплуатации их формирующих устройств невозможен, так как отсутствует информация о внутреннем их сопротивлении. Эту ситуацию могло бы исправить измерение уровня помех при помощи двух ЭС с разным полным сопротивлением. Такой подход необходим для перехода к инженерному применению результатов измерений по ЭМС, по крайней мере на уровне некоторых широко применяемых компонентов и функционально законченных блоков, формирующих в процессе работы заметные кондуктивные помехи. Область применения данного подхода должна быть очерчена в ходе теоретической проработки поставленной проблемы.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51317.2.5–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. М.: Издательство стандартов, 2001. 40 с.
2. Шрайбер Г. 300 схем источников питания. Выпрямители, импульсные источники питания, линейные стабилизаторы и преобразователи. М.: ДМК, 2000. 224 с.
3. Лемешко Н.В., Захарова С.С. Определение закона широтно-импульсной модуляции без использования вспомогательных сигналов // Электросвязь. 2022. № 4. С. 58–64.
4. Лютов С.А. Индустримальные помехи радиоприему и борьба с ними. М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951. 239 с.
5. Бютицкий И.Б., Музылева И.В. Электрические машины. Двигатель постоянного тока. Курсовое проектирование. М.: Лань, 2018. 168 с.
6. Лемешко Н.В., Горелкин М.В. Измерения помех, формируемых двигателями постоянного тока, с помощью приборов компании Rigol. Часть 1 // Электронника: наука, технология, бизнес. 2024. № 4 (235). С. 104–110.
7. Бузов А.Л., Быховский М.А., Васехо Н.В. и др. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / под ред. М.А. Быховского М.: Эко-Трендз, 2006. 376 с.
8. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / пер. с англ. В.С. Кармашева, Л.Н. Кечиева. М.: Издательский дом «Технологии», 2003. 540 с.
9. ГОСТ Р 51319–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения индустримальных радиопомех. Технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2000. 57 с.
10. ГОСТ Р 51318.16.1.1–2007. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров индустримальных радиопомех и методы измерений. Часть 1–1. Аппаратура для измерения параметров индустримальных радиопомех и помехоустойчивости. Приборы для измерения индустримальных радиопомех. М.: Стандартинформ, 2008. 58 с.
11. ГОСТ 51320–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи индустримальные. Методы испытаний технических средств – источников индустримальных помех. М.: Издательство стандартов, 2000. 39 с.
12. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. 632 с.

Reference

1. GOST R 51317.2.5–2000. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Elektro-magnitnaya obstanovka. Klassifikatsiya elektromagnitnykh pomekh v mestakh razmeshcheniya tekhnicheskikh sredstv [GOST R 51317.2.5-2000. Compatibility of technical means is electromagnetic. Electromagnetic environment. Classification of electromagnetic interference in places where technical means are placed] Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards]. Moscow. 2001. 40 p.
2. Schraiber G. (2000) 300 skhem istochnikov pitaniya. Vypryamiteli, impul'snye istochniki pitaniya, lineynye stabilizatory i preobrazovateli [300 schemes of power sources. Rectifiers, switching power sources, linear stabilizers and converters] DMK [DMK]. Moscow. 224 p.
3. Lemeshko N.V., Zakharova S.S. (2022) Opredelenie zakona shirotno-impul'snoy modulyatsii bez ispol'zovaniya vspomogatel'nykh signalov [Determination of the law of pulse-width modulation without the use of auxiliary signals] Elektrosvyaz' [Electrosvyaz]. No. 4. P. 58–64.
4. Lyutov S.A. (1951) Industrial'nye pomekhi radiopriemu i bor'ba s nimi [Industrial interference to radio reception and the fight against them] Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo [Gosudarstvennoe Energeticheskoe izdatelstvo]. Moscow. 239 p.
5. Byutitsky I.B., Muzyleva I.V. (2018) Elektricheskie mashiny. Dvigatel' postoyannogo toka. Kursovoe proektirovanie [Electric machines. DC motor. Course design] Lan' [Lan Publ]. Moscow. 168 p.
6. Lemeshko N.V., Gorelkin M.V. (2024) Izmereniya pomekh, formiruemykh dvigateleyami postoyannogo toka, s pomoshch'yu priborov kompanii Rigol [Measurement of interference generated by DC motors using Rigol devices] Chast' 1. Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes [Part 1. Electronics: science, technology, business]. No. 4 (235). P. 104–110.
7. Buzov A.L., Bykhovsky M.A., Vasekho N.V. et al. (2006) Upravlenie radiochastotnym spektrom i elektromagnitnaya sovmestimost' radiosistem. Pod red. M.A. Bykhovskogo [Radio frequency spectrum management and electromagnetic compatibility of radio systems. Ed. by M.A. Bykhovsky] Eko-Trendz [Eco-Trends]. Moscow. 2006. 376 p.
8. Williams T. (2003) EMS dlya razrabotchikov produktov [EMS for product developers] Izdatel'skiy dom «Tekhnologii» [Publishing House «Technologies»]. Moscow. 540 p.
9. GOST R 51319–99. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Pribory dlya izmereniya industrial'nykh radiopomekh. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy [GOST R 51319-99. Compatibility of technical means is electromagnetic. Devices for measuring industrial radio interference. Technical requirements and test methods] Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards]. Moscow. 2000. 57 p.
10. GOST R 51318.16.1.1–2007. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Trebovaniya k apparature dlya izmereniya parametrov industrial'nykh radiopomekh i metody izmereniy. Chast' 1–1. Apparatura dlya izmereniya parametrov industrial'nykh radiopomekh i pomekhoustoichivosti. Pribory dlya izmereniya industrial'nykh radiopomekh [GOST R 51318.16.1.1-2007. Compatibility of technical means is electromagnetic. Requirements for equipment for measuring parameters of industrial radio interference and measurement methods. Part 1-1. Equipment for measuring parameters of industrial radio interference and noise immunity. Devices for measuring industrial radio interference] Standartinform [Standartinform]. Moscow. 2008. 58 p.
11. GOST 51320–99. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Radiopomekhi industrial'nye. Metody ispytaniy tekhnicheskikh sredstv – istochnikov industrial'nykh pomekh [GOST 51320-99. Compatibility of technical means is electromagnetic. Industrial radio interference. Methods of test equipment, industrial noise sources] Izdatel'stvo standartov [Publishing house of standards]. Moscow. 2000. 39 p.
12. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. (2003) Chislennye metody [Numerical methods] Binom. Laboratoriya znanii [Binom. Laboratory of Knowledge]. Moscow. 632 p.