

**На правах рукописи**

**ФИЛИПП ВАЛЕРИЙ БОГДАНОВИЧ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА  
С РЕЛЬСОВЫМИ ЦЕПЯМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
ЩУРОВ Николай Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.  
ГАРГАНЕЕВ Александр Георгиевич

кандидат технических наук, доцент  
КАВЕШНИКОВ Владимир Михайлович

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «20» ноября 2008 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу:

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2008 г.

Ученый секретарь  
кандидат технических наук, доцент

Бородин Н.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Железнодорожный транспорт России является важнейшим звеном транспортной системы страны, на долю которого приходится около 70 % внутреннего грузооборота страны и почти 60 % пассажирских перевозок. Более 80 % перевозочной работы при этом осуществляется подвижным составом на электрической тяге. При этом уровень транспортного обеспечения отраслей общественного хозяйства страны определяется качеством путевой структуры железных дорог и непосредственно подвижного состава. После резкого снижения объемов перевозок на железнодорожном транспорте в 90 – е годы, начиная с 1998 г. происходит их постоянный рост.

В условиях реформирования отрасли, осуществляемой в настоящее время ОАО «РЖД», одной из важнейших целевых инвестиционных программ является «Комплексная программа реорганизации и развития локомотивостроения...», включающая переход на производство электроподвижного состава (ЭПС) с бесколлекторным и, в частности, асинхронным тяговым приводом. Для регулирования скорости и силы тяги на ЭПС с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) применяются тяговые преобразователи частоты (ТПЧ), осуществляющие преобразование энергии в импульсном режиме. Наличие на ЭПС импульсных преобразователей, выполненных на управляемых полупроводниковых приборах, приводит к тому, что в силовых цепях наряду с полезными сигналами формируются и распространяются сигналы в широком частотном диапазоне, оказывающие мешающее влияние на другие технические устройства систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ).

Из теоретических и практических исследований следует, что устройства, обеспечивающие безопасность движения поездов: автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС); сигнализация, централизация и блокировка (СЦБ); рельсовые цепи, чаще всего подвергаются такому влиянию. Поэтому необходимо уделять внимание надежному функционированию систем передачи информации о состоянии (свободности или занятости) участков пути, так как устойчивая и безотказная работа устройств данных систем является основой обеспечения безопасности движения. В первую очередь, для определения электромагнитной совместимости ЭПС с рельсовыми цепями необходимым условием является ограничение уровней электромагнитных помех (ЭМП), создаваемых ЭПС, и разработка средств снижения мешающих воздействий до уровней, допустимых для устойчивой работы устройств СЖАТ.

Так как для российских железных дорог в настоящее время также нет утвержденных государственных нормативов на допустимые уровни гармонических составляющих тягового тока ЭПС, то при решении вопросов обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) с устройствами СЖАТ следует руководствоваться нормативами, утвержденными в ОАО «РЖД», или нормами, указанными в технических заданиях на их разработку.

**Цели и задачи научного исследования.** Целью диссертационной работы является разработка методов и средств, обеспечивающих снижение уровня электромагнитных помех при работе тягового преобразователя частоты ЭПС посто-

янного тока с асинхронными тяговыми двигателями.

В соответствии с поставленной целью требовалось решить следующие задачи.

1. Выявить механизмы возникновения помех в асинхронном тяговом электроприводе.

2. Разработать методику измерения параметров асинхронного тягового привода в сложной электромагнитной обстановке.

3. Разработать комплекс компьютерных программ, включающий алгоритмы анализа гармонического состава нестационарных сигналов и расчета амплитудных частотно - временных характеристик кондуктивных помех, определяющих степень помехоэмиссии элементов тягового привода.

4. Разработать требования к определению параметров входного сглаживающего фильтра для обеспечения им электромагнитной совместимости асинхронного тягового привода ЭПС с рельсовыми цепями.

5. Разработать схемное решение входного сглаживающего фильтра ЭПС, позволяющего снизить уровень помехоэмиссии асинхронного тягового привода до требуемых значений.

6. Разработать рекомендации по снижению мешающего влияния элементов тягового электропривода с автономным инвертором напряжения (АИН) на рельсовые цепи.

**Методы исследования.** В основу теоретических исследований положен математический аппарат, включающий использование аналитических и численных методов решения дифференциальных уравнений, элементы теории вероятностей и математической статистики, теорию вейвлет - преобразований и методы цифровой обработки сигналов. Расчеты и математические модели выполнены с использованием математических пакетов “MathCad” и “Matlab”.

Экспериментальные исследования проводились на натурном стенде асинхронного тягового электропривода сибирского филиала всероссийского научно – исследовательского и конструкторско – технологического института (СФ ВНИКТИ).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты теоретических исследований методов гармонического анализа нестационарных сигналов в рамках задачи разработки мероприятий, направленных на обеспечение ЭМС электровозов с рельсовыми цепями.

2. Алгоритм программы идентификации помех в сигнале тягового тока, предназначенный для оценки уровня помехоэмиссии асинхронным тяговым приводом.

3. Электрическая схема разработанного пассивного двухзвенного фильтра с резонансным контуром для ЭПС постоянного тока.

4. Результаты оценки уровня помехоэмиссии асинхронного тягового привода и эффективности внедрения разработанного фильтра.

**Научная новизна диссертационной работы.**

1. Выполнен комплексный анализ причин отказов в работе рельсовых цепей и обоснована необходимость разработки методов и средств, снижающих влияние гармоник тягового тока электровозов, способное привести к ложному контролю свободности рельсовых цепей при их фактической занятости.

2. Предложена методика идентификации кондуктивных помех, позволяющая оценить степень влияния асинхронного тягового привода на работу рельсовых цепей посредством применения техники непрерывного вейвлет – анализа.

3. Разработано схемное решение сглаживающего фильтра, обеспечивающее более эффективное подавление гармонических составляющих тягового тока на несущих частотах рельсовых цепей по сравнению с фильтрами на эксплуатируемом электроподвижном составе.

4. Разработан комплекс мероприятий, позволяющий обеспечить ЭМС асинхронного тягового привода с рельсовыми цепями.

**Практическая ценность результатов работы** заключается в решении актуальной комплексной задачи разработки методов и средств, обеспечивающих условия ЭМС перспективного ЭПС с рельсовыми цепями. Разработанный программный комплекс вейвлет - анализа дискретных сигналов реализован в рамках научно - исследовательских работ по разработке асинхронного тягового электропривода для опытного образца пассажирского электровоза нового поколения. Использование разработанных рекомендаций по расчету параметров входного фильтра и метода расчета мешающего влияния тягового тока при проектировании и сертификации ЭПС сокращает сроки опытно – конструкторских работ, повышает точность расчетов и позволяет обеспечить высокий уровень безопасности грузопассажирских перевозок.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы используются для оценки электромагнитной совместимости вновь проектируемого тягового электропривода электроподвижного состава мощностью  $7200 \text{ кВт}$  типа ЭП2 с рельсовыми цепями. Предложенные методики и результаты экспериментов позволили значительно сократить время расчетов преобразовательного оборудования на стадии проектирования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VI всероссийской научно-технической конференции «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, НГТУ, 2005); XII международной научно-технической конференции «Транспортные системы Сибири» (г. Красноярск, КГТУ, 2005); XII всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, ТПУ, 2006), III научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ - 2007» (г. Новосибирск, НГТУ, 2007); заседаниях научно – технического совета Сибирского филиала ВНИКТИ 2005 - 2007 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в числе которых: 3 статьи, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 научная статья в сборнике научных трудов и 6 докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 137 наименований и 6 приложений. Общий объем диссертации 166 страниц, из них 140 основного текста, включая 63 рисунка и 15 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность темы и направление научного исследования. Сформулированы цели, задачи работы и предполагаемые пути решения, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной значимости, новизне и практической ценности результатов исследований, реализации и апробации работы.

**В первой главе** представлены результаты обзора отечественной и зарубежной научно – технической литературы, посвященной анализу условий электромагнитной совместимости ЭПС с устройствами систем железнодорожной автоматики и телемеханики, проведено исследование источников электромагнитных помех на электрифицированных железных дорогах.

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости ЭПС с устройствами систем железнодорожной автоматики и телемеханики является наиболее острой и актуальной, так как в таких устройствах в качестве сигнальных цепей используются рельсовые цепи, являющиеся одновременно обратным проводом для протекания тягового тока.

Источниками помех на электрифицированных железных дорогах являются тяговые подстанции, тяговая сеть и электроподвижной состав. Главной причиной возникновения искажений токов и напряжений является нелинейность элементов систем электропередачи и электропотребления.

Основными источниками помех в системе электроснабжения постоянного тока при импульсном регулировании напряжения асинхронных тяговых двигателей являются тяговые и вспомогательные преобразователи, работа которых вызывает искажения токов и напряжений в силовых цепях ЭПС. Вместе с этим, переходные процессы в цепи тягового тока, возникают в случаях изменения режимов работы асинхронных тяговых двигателей, либо при колебаниях переходных сопротивлений в цепи, пролегающей от тяговых двигателей к рельсам.

Тяговые токи в рельсовых цепях непрерывно изменяются. Потребляемый электровозом ток, при трогании, за несколько секунд достигает максимального значения, а затем, при отключении тяговых двигателей резко падает. Такие изменения наводят в приемных трактах рельсовых цепей ЭДС импульсного характера. В отдельных случаях, в тяговой сети возникают резонансные явления, которые приводят к усилению отдельных гармонических составляющих тягового тока, в результате чего возрастает вероятность сбоев в работе рельсовых цепей и других устройств СЖАТ.

Влияние спектра тягового тока также проявляется и в установившихся режимах работы тяговых двигателей. В случае использования асинхронного тягового электропривода на электровозах, мешающее влияние оказывает переменная составляющая магнитного поля в ходовых частях ЭПС. Ходовые части электроподвижного состава, наиболее приближенные к приемной системе воздействуют своим магнитным полем на приемную систему АЛС.

Проведенный анализ показал, что основными мероприятиями по снижению уровня ЭМП на ЭПС при условии сохранения высоких энергетических и ограниченных массогабаритных показателей преобразовательного оборудования

являются: увеличение максимальной частоты регулирования импульсных преобразователей; выбор схемных решений и оптимальных параметров входных фильтров.

Анализ применяемых в настоящее время электрических схем перспективного ЭПС постоянного тока на российских и зарубежных железных дорогах показал, что наиболее часто применяются электровозы, оснащенные АТД с непосредственным подключением автономного инвертора напряжения (АИН) к контактной сети через сглаживающий фильтр. Обзор схемных решений входных фильтров, применяемых на эксплуатируемом ЭПС, показал преобладание пассивных  $LC$  – фильтров, выполняемых, как правило, одно – или двухзвенными.

В ходе обзора литературных источников установлено, что используемые в настоящее время методы и средства анализа гармонического состава тягового тока основаны на применении преобразования Фурье. Однако, учитывая необходимость в определении амплитудных частотно – временных характеристик тягового тока, согласно норм по ЭМС «НБЖТ ЦТ 04-98 МПС России», применение данного математического аппарата неэффективно. Это связано с тем, что преобразование Фурье предназначено для разложения в ряды только стационарных сигналов, то есть тех сигналов, частотное наполнение которых неизменно во времени. Таким образом, возникает необходимость исследования спектрального состава тягового тока ЭПС более совершенными методами гармонического анализа.

**Во второй главе** выполнены исследования теоретических основ построения методов гармонического анализа сигналов. Исследования показали, что в приложении к обработке нестационарных сигналов, наиболее приемлемой для оценки уровня мешающего влияния гармонических составляющих тягового тока, является техника вейвлет – анализа. В этой связи, для определения степени помехоэмиссии тягового электропривода, формулируется задача создания методики анализа нестационарных процессов в элементах тягового электропривода с применением вейвлет - методов.

С целью решения задачи анализа гармонического состава нестационарных сигналов, в диссертации предложена методика, основанная на применении непрерывного вейвлет - преобразования. При этом проанализированы методы вейвлет - преобразований в сопоставлении с методами преобразований Фурье для определения их основных особенностей и различий. Показано что, основная концепция построения вейвлет - методов состоит в представлении сигнала в виде совокупности сдвигов и сжатий некоторой функции – вейвлета. Вейвлет - функция локализована во времени и по частоте, что обеспечивает вейвлет - преобразование свойством обнаруживать локальные кратковременные особенности сигнала.

Непрерывное вейвлет - преобразование представляет собой скалярное произведение исследуемой функции и двухпараметрической вейвлет - функции:

$$W(a,b) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

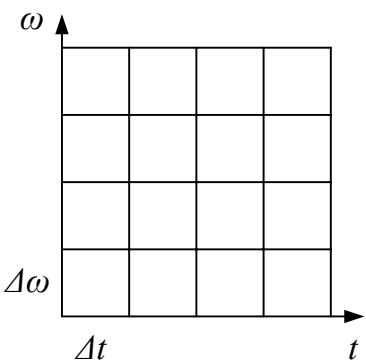
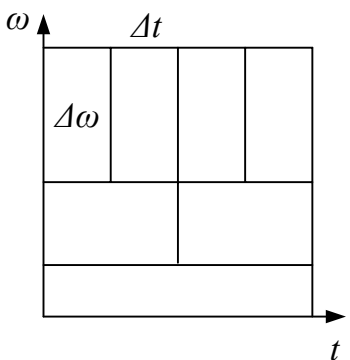
где символом \* обозначена процедура комплексного сопряжения.

Параметр  $a$  определяет масштаб вейвлета, поэтому изменение этого параметра приводит к его сжатию или растяжению. Малые значения параметра  $a$  задают высокие частоты, а большие значения - малые частоты. Параметр  $b$  определяет положение центра временной локализации вейвлета. Выражение  $\psi(t - b)$  является локальной функцией (окном), которая сдвигается вдоль временной оси для вычисления преобразования в нескольких позициях  $b$ . Преобразование становится зависимым от времени, поэтому в результате получается частотно - временное описание сигнала.

В работе проводится сравнение непрерывного вейвлет - преобразования и оконного преобразования Фурье (табл. 1). Различие между вейвлет - анализом и оконным преобразованием Фурье состоит в выборе анализирующих функций  $w$  и  $\psi$ , которые имеют различный вид. В случае оконного преобразования Фурье функция  $w$  имеет одинаковую ширину, независимо от частоты. В противоположность, вейвлет - анализ с функциями  $\psi$  приводит автоматически к эффективному окну по времени, подстроенному под исследуемый сигнал.

Таблица 1

Сравнительная оценка методов гармонического анализа

Метод анализа	Оконное преобразование Фурье	Вейвлет – преобразование
Анализирующая функция	Оконная функция (Хэннинга, Хэмминга и т.п.)	Вейвлет – функция (вейвлет Пауля, Морле и т.п.)
Математическое описание	$X_{STFT}(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)w(t-\tau)e^{-i\omega t} dt$	$W(a, b) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$
Решетки пространственно – временной локализации		

При разработке алгоритма анализа гармонических составляющих сигнала тягового тока (рис. 1) ставилась задача выбора вейвлета, которая решалась путем оценки параметров локализации анализирующих вейвлет – функций по времени и по частоте. Параметры локализации ряда вейвлетов вычислены с использованием специально разработанной программы, позволяющей численно получать энергию вейвлета, ширину во времени, ширину по частоте и общее разрешение.

В результате анализа параметров локализации различных вейвлетов показано, что наибольшим разрешением анализа обладает вейвлет Морле, общее раз-



решение которого равно 1/2 и является теоретически предельно возможным. Аналитическое выражение вейвлета Морле имеет вид:

$$\psi_0(t) = \sqrt{\pi F_b} e^{i2\pi F_c t} e^{-t^2 / F_b}, \quad (2)$$

где  $F_C$  – центральная частота вейвлета,  $F_b$  – ширина полосы пропускания.

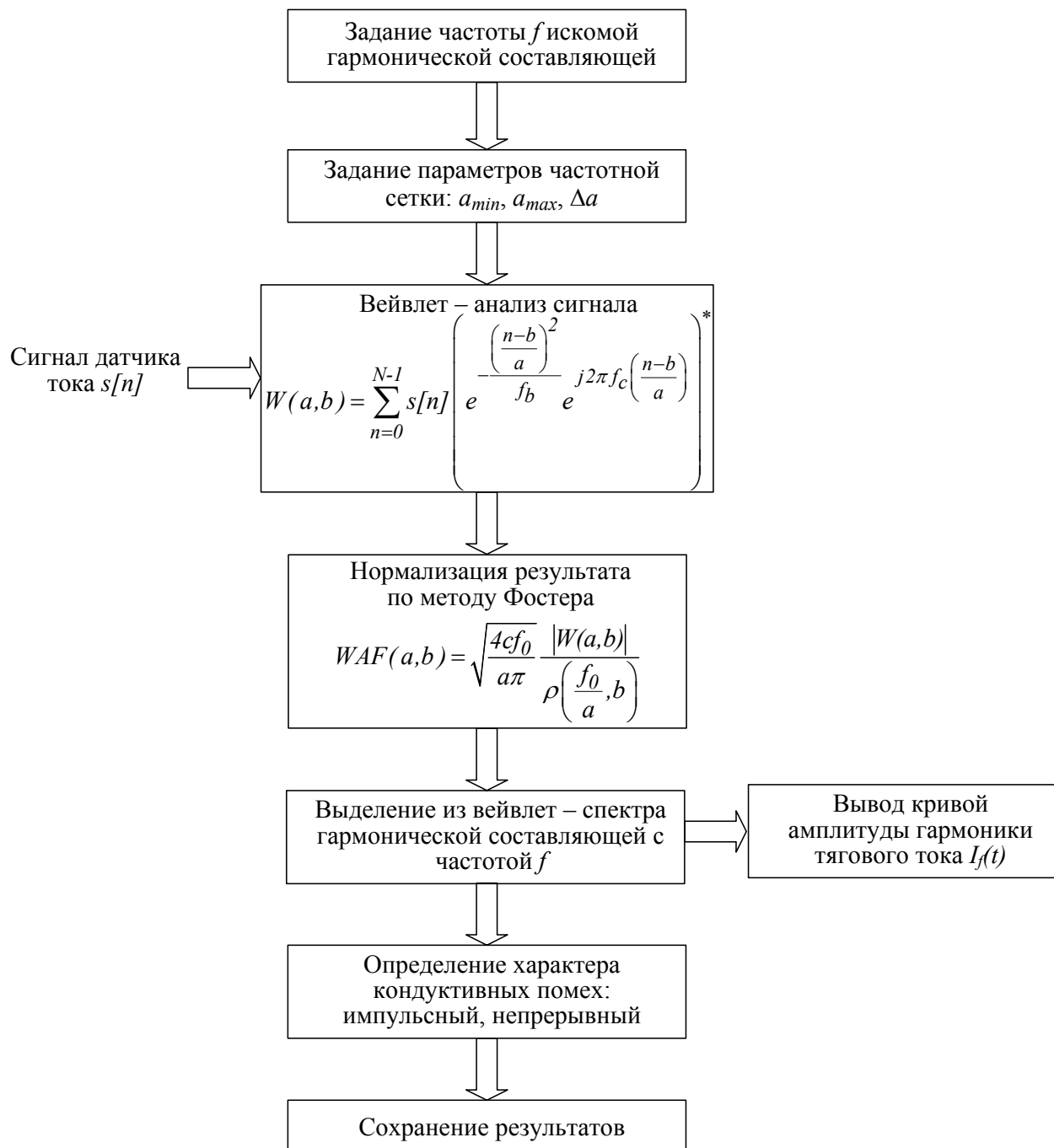


Рис. 1. Структурная схема алгоритма программы идентификации помех

Для исключения зависимости амплитуд гармонических компонент от масштаба анализа, результаты нормируются по методу Г. Фостера.

Разработанный алгоритм расчета амплитуды и времени существования гармонических составляющих тягового тока на частотах, равных частотам сиг-

нальных токов  $f_{rc}$  рельсовых цепей – 25 и 50 Гц, основан на классификации импульсных (длительность гармонических составляющих не более 300 мс) и непрерывных (длительность  $\geq 300$  мс) помех. В соответствии с нормативом «НБЖТ ЦТ 04-98 МПС России», максимально допустимое значение амплитуды импульсной помехи не должно превышать 16,6 А, а непрерывной – 1,4 А. Графическая интерпретация функционирования разработанного метода идентификации помех поясняется рис. 2.

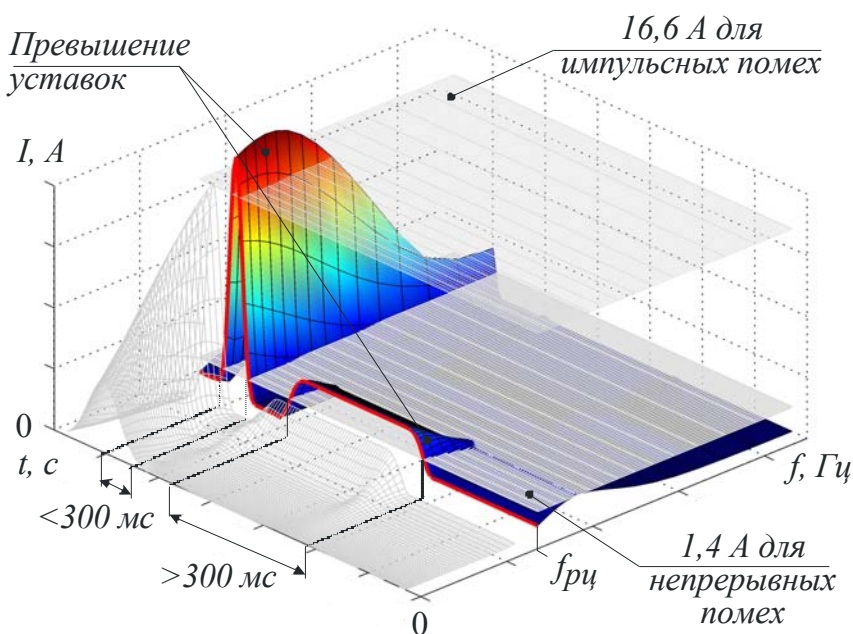


Рис. 2. Графическая интерпретация метода идентификации электромагнитных помех

Очевидно, что при исследованиях переходных процессов в тяговом электроприводе, включающих гармонический анализ сигналов, средства Фурье – анализа не дают должного представления о частотно – временных характеристиках отдельных гармонических составляющих.

Способность вейвлет – методов адаптироваться к масштабу анализа позволяет

дифференцировать кратковременные изменения в сигнале. Эту способность наследует предложенный алгоритм анализа, который позволяет идентифицировать помехи по нормированным значениям параметров гармонических составляющих сигналов. При этом выбор параметров вейвлет – анализа для определения амплитудных частотно – временных характеристик сигналов, является неформализованной задачей, что в свою очередь позволяет применять разработанный алгоритм (рис. 1) для решения иных задач.

**Третья глава** посвящена исследованию одного из мероприятий по снижению электромагнитных помех на ЭПС: выбору схемных решений и оптимальных параметров входных фильтров. В состав большинства тяговых преобразователей входят пассивные LC – фильтры, относительная доля массогабаритных показателей которых весьма существенна. В свою очередь массогабаритные показатели любого фильтра зависят от частоты и уровня допустимых пульсаций по току и напряжению, вызванных наличием электромагнитных процессов, порождающих помехи в силовых цепях тягового привода.

При детальном рассмотрении источников ЭМП в асинхронном тяговом электроприводе с импульсным регулированием выявлена двойственная природа возникновения помех (рис. 3) и дана оценка негативного влияния каждого из элементов привода на гармонический состав.

Во - первых, возникновение помех может быть результатом электромагнитных процессов, как в силовой цепи электропривода, так и в цепях управления; во - вторых – результатом воздействия механической части электропривода. В работе подробно изложен механизм негативного воздействия отдельных элементов, как электрической, так и механической части тягового электропривода на гармонический состав тягового тока.



Рис. 3. Источники помех в тяговом электроприводе

Оценка помехоподавляющих свойств входных фильтров эксплуатируемого ЭПС и разработка новых схемных решений фильтров, в соответствии с обобщенной структурной схемой асинхронного тягового электропривода (рис. 4), основана на определении оптимального коэффициента сглаживания.

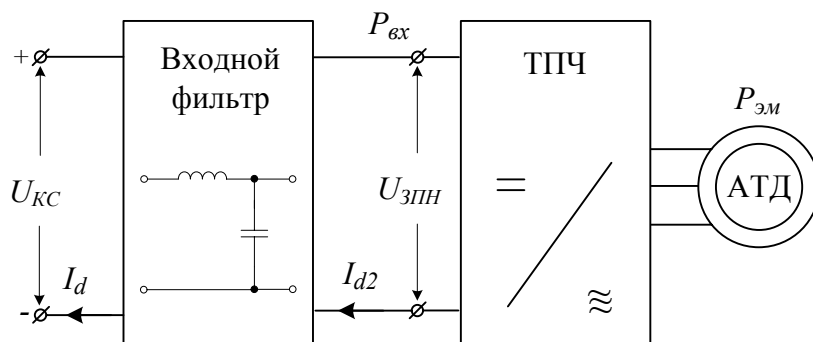


Рис. 4. Структурная схема тягового электропривода

В соответствии со структурной схемой (рис. 4), пренебрегая потерями в тяговом преобразователе частоты и асинхронном тяговом двигателе на основании закона сохранения энергии, запишем уравнение баланса мощностей:

$$P_{вх} = P_{эм}, \quad (3)$$

где  $P_{вх} = U_{ЗПН} I_{d2}$  – мощность на входе ТПЧ, Вт;  $P_{вх} = \omega M_e$  – мощность на валу асинхронного тягового двигателя, Вт.

Тогда величина электромагнитного момента двигателя равна:

$$M_e = \frac{U_{3ПН}}{\omega} I_{d2}, \text{ Нм}, \quad (4)$$

где  $U_{3ПН}$  – напряжение в звене постоянного напряжения, В;  $\omega$  – угловая скорость вращения вала АТД, рад/с;  $I_{d2}$  – ток, потребляемый тяговым преобразователем частоты, А.

Качественно процесс изменения электромагнитного момента АТД представлен на рис. 5.

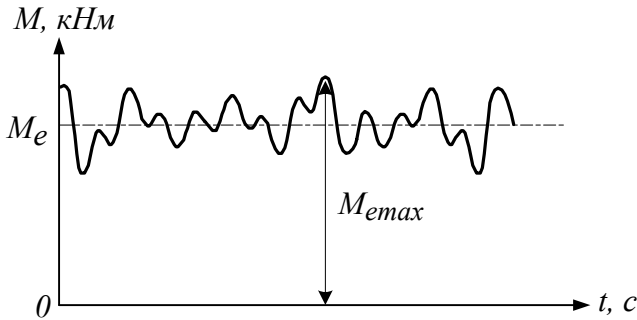


Рис. 5. Пульсации момента АТД

Так как  $\Delta M = M_{emax} - M_e$ , то по выражению (4), приняв  $U_{3ПН} = const$  и  $\omega = const$ , запишем

$$\Delta M = \frac{U_{3ПН}}{\omega} (I_{d2max} - I_{d2}), \text{ Нм}. \quad (5)$$

Учитывая, что  $\Delta I_{d2} = I_{d2max} - I_{d2}$ , разделим обе части выражения (5) на величину  $M_e$ , определим

$$\frac{\Delta M}{M_e} = \frac{U_{3ПН} \Delta I_{d2}}{\omega M_e}. \quad (6)$$

Поскольку коэффициент пульсаций электромагнитного момента равен  $k_M = \Delta M / M_e$ , то, подставив данное выражение в (6), получим

$$\Delta I_{d2} = k_M \frac{P_{эм}}{U_{3ПН}}, \text{ А}. \quad (7)$$

Коэффициент сглаживания входного фильтра определяется как отношение сигнала на выходе фильтра к сигналу на его входе (рис. 4)  $\alpha = \Delta I_d / \Delta I_{d2}$ , подставив данное выражение в (7) и приняв  $\Delta I_d = \sqrt{2} I_{дон}$ , получим выражение оптимального коэффициента сглаживания фильтра на частотах сигнальных токов рельсовых цепей:

$$\alpha_f = 20 \log \left( \frac{\sqrt{2} I_{дон} U_{3ПН}}{k_M P_{эм}} \right), \text{ дБ}, \quad (8)$$

где  $I_{дон}$  – допустимое эффективное значение гармоники тягового тока по нормативам НБЖТ ЦТ 04-98, А.

По известным параметрам элементов входных фильтров отечественных электровозов ЭП10, 2ЭС4А и рассчитанному коэффициенту сглаживания при  $U_{3ПН} = 2,2 \text{ кВ}$  и  $P_{эм} = 2,4 \text{ МВт}$ , выполнен анализ помехоподавляющих свойств фильтров. Исходя из требований по эксплуатации к предельно допустимым пульсациям момента на валу тяговых двигателей, при которых  $k_M \leq 10 \%$ , в соответствии с выражением (8) определено предельное значение коэффициента сглаживания, результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты сглаживания  
фильтров на частотах 25 и 50 Гц

Тип ЭПС	$\alpha_{25}, \text{дБ}$	$\alpha_{50}, \text{дБ}$	$\alpha_n, \text{дБ}$
ЭП10	-7,3	-21,7	-37,7
2ЭС4А	-12,5	-24,2	

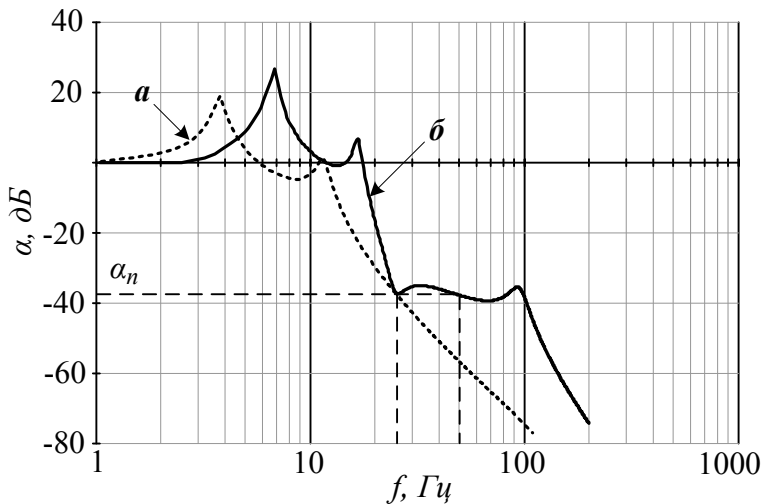


Рис. 6. Двухзвенный фильтр: *а* - без резонансного контура; *б* - с резонансным контуром

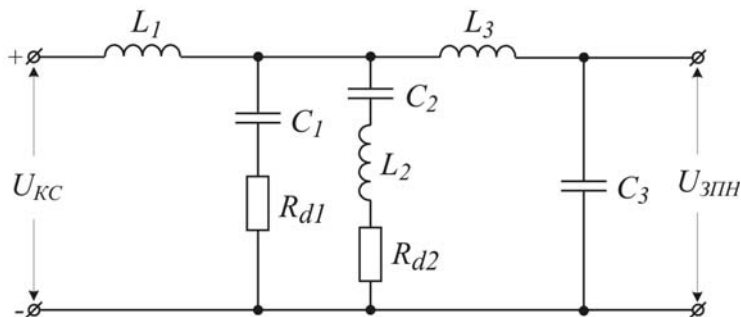


Рис. 7. Электрическая схема двухзвенного фильтра с резонансным контуром

Исходя из рассчитанного предельного значения коэффициента сглаживания  $\alpha_n$ , проведен синтез двухзвенного входного фильтра, в результате которого определены его параметры и построена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) при возмущающем воздействии со стороны тягового преобразователя частоты (рис. 6).

Учитывая проблему минимизации массогабаритных показателей входного фильтра, автором предложена схема двухзвенного фильтра с резонансным контуром (рис. 7). По рассчитанным параметрам элементов данного фильтра:  $L_1 = L_3 = 11 \text{ мГн}$ ;  $L_2 = 5 \text{ мГн}$ ;  $C_1 = 1 \text{ мФ}$ ,  $C_2 = 8 \text{ мФ}$ ;  $C_3 = 11 \text{ мФ}$ ;  $R_{d1} = 0,3 \text{ Ом}$ ;  $R_{d2} = 0,1 \text{ Ом}$  построена его ЛАЧХ (рис. 6).

С учетом показателей удельной емкости и индуктивности, рассчитана масса отдельных элементов и суммарная масса рассматриваемых фильтров (табл. 3). Из

приведенных расчетов видно, что масса разработанного двухзвенного фильтра с резонансным контуром в  $\sqrt{3}$  раза меньше массы двухзвенного фильтра, обеспечивающего предельный коэффициент сглаживания. Из табл. 2 и 3 видно, что разработанный фильтр обеспечивает подавление гармоник тягового тока на частотах рельсовых цепей 25 и 50 Гц в 18,2 и 4,8 раза эффективнее, чем фильтры эксплуатируемых электровозов при тех же массогабаритных показателях.

В четвертой главе рассматриваются результаты экспериментальных исследований электромагнитных процессов асинхронного тягового электропривода электровоза. Экспериментальные исследования проводились на стенде натурной мощности сибирского филиала всероссийского научно-исследовательского и конструкторского – технологического института. В качестве нагрузки автономного инвертора, изготовленного для проектируемого пассажирского электровоза,

тровоza ЭП2, использовался асинхронный тяговый двигатель НТА - 1200.

Таблица 3 Упрощенная электрическая схема

Масса элементов двухзвенных фильтров

Масса	Не обеспечивает $\alpha_n$	Обеспечивает $\alpha_n$	
	Без резонансного контура, на ЭПС	Без резонансного контура	С резонансным контуром
$m_L, кг$	3107	5600	3200
$m_C, кг$	1760	2471	1470
$m_{\Sigma}, кг$	4867	8071	<b>4670</b>

турного стенда тягового электропривода показана на *рис. 8*. На схеме обозначено:  $L_{\phi} = 24 мГн$  – индуктивность дросселя;  $C_{\phi} = 8800 мкФ$  – емкость фильтровых конденсаторов;

$R_{\delta} = 0,25 Ом$  – демпферное сопротивление,  $VT7$  – ключ тормозного модуля,  $R_m = 10 Ом$  – сопротивление тормозных реостатов;  $VT1...VT6$  – ключи АИН; ИК – измерительный комплекс National Instruments.

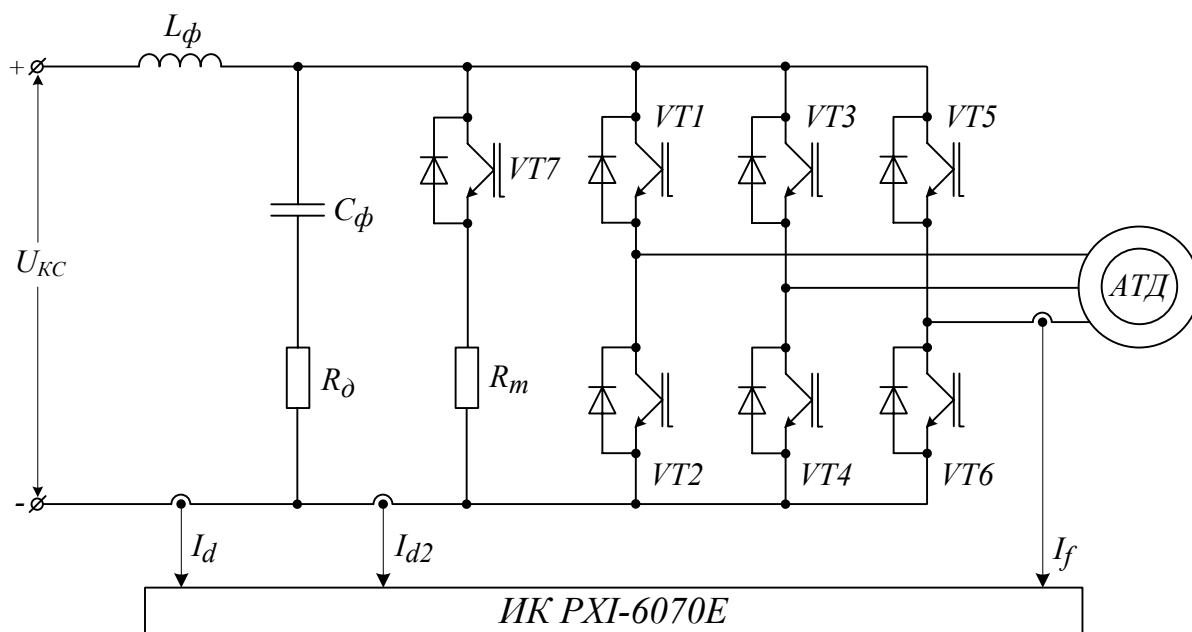


Рис. 8. Электрическая схема натурного стенда испытуемого тягового электропривода

Эксперименты проводились при:

- напряжении контактной сети  $U_{KC} = 3400 В$ ;
- выходной частоте АИН  $f_s = 0...65 Гц$ ;
- действующем значении фазного тока  $I_f = 250...390 А$ ;
- частоте коммутации IGBT - модулей  $f_{pwm} = 500 Гц$ .

Для решения задачи разработки единой методики оценки помехоэмиссии и рекомендаций по снижению уровня кондуктивных помех тяговым приводом, экспериментальные исследования проводились в два этапа:

- исследование электромагнитных процессов в режиме работы тягового электропривода на заторможенный тяговый двигатель;
- исследование электромагнитных процессов при работе тягового электропривода в режиме тяги с выходом на номинальную скорость.

В ходе проведенных исследований режима работы привода на заторможенный двигатель, сняты осциллограммы токов, и с использованием разработанного алгоритма вейвлет – анализа получены кривые изменения амплитуд гармонических составляющих на нормируемых частотах. Исследования электромагнитных процессов показали, что изменение амплитуд гармонических составляющих носит случайный характер.

Так как изменение амплитуд гармоник происходит под воздействием значительного числа независимых факторов, то для количественной оценки случайных колебаний амплитуд гармонических составляющих применен подход с позиций теории случайных величин. В ходе проведенной статистической обработки данных определен доверительный интервал изменения гармоник на нормируемых частотах, который и определил погрешность измерения в каждом измерительном канале.

Для оценки уровня помехоэмиссии элементов асинхронного тягового привода на втором этапе экспериментальных исследований были получены осциллограммы фазного тока двигателя -  $I_f$ , входного тока ТПЧ –  $I_{d2}$  и тягового тока –  $I_d$  при работе электропривода в двигательном режиме. С учетом найденной погрешности измерения, по разработанному алгоритму идентификации помех (рис. 2), построены кривые изменения амплитуд гармонических составляющих на частотах 25 и 50 Гц (рис. 9).

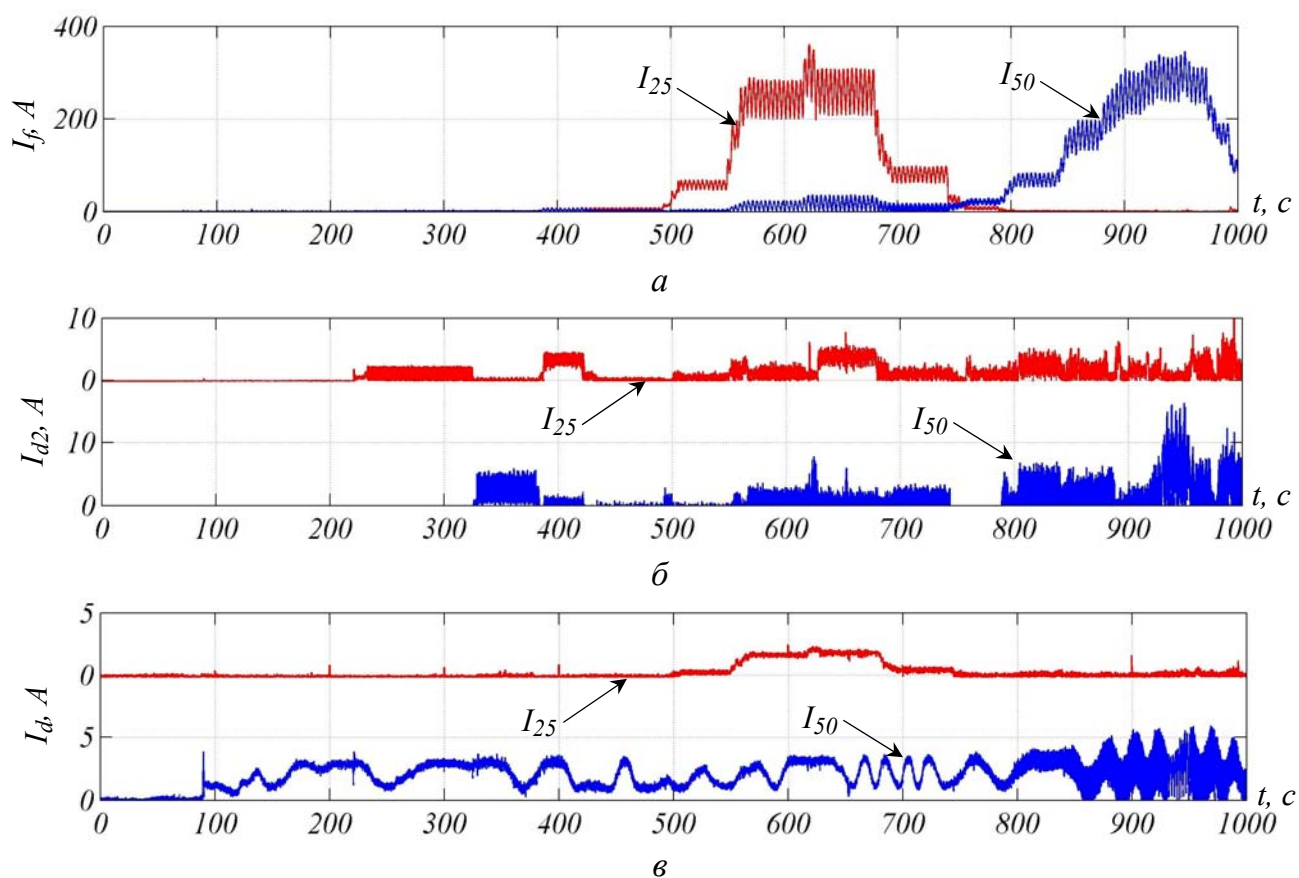


Рис. 9. Осциллограммы гармоник с частотами 25 и 50 Гц:  
 а - фазный ток двигателя; б - входной ток ТПЧ; в – тяговый ток

При анализе осциллограммы гармоник тягового тока (рис. 9, в) и фазного тока двигателя (рис. 9, а), установлено, что появление максимумов амплитуд гармоник в тяговом токе вызвано наличием ЭДС вращения тягового двигателя. Помимо этого, присутствие в спектре тягового тока гармоники 50 Гц в течение всего времени опыта, обусловлено частотным наполнением кривой выпрямленного напряжения контактной сети.

По приведенным кривым определены максимальные значения непрерывных и импульсных помех (табл. 4). Из таблицы видно, что однозвенный фильтр не обеспечивает требуемый коэффициент сглаживания – 37,7 дБ, и соответственно не обеспечит ЭМС исследуемого привода с рельсовыми цепями даже при работе на один АТД.

Таблица 4

Параметры нормируемых гармоник тягового  $I_d$  и фазного  $I_f$  токов

Частота нормируемой гармоники	25 Гц	50 Гц
Максимальное значение непрерывной помехи, $I_{сmax}^*$ , о.е.	1,4	3,4
Максимальное значение импульсной помехи, $I_{smax}^*$ , о.е.	0,11	0,28
Максимальное значение основной гармоники фазного тока АТД, $I_{fmax}$ , А	357,4	349,4

Для оценки эффективности разработанного фильтра были рассчитаны максимальные значения нормируемых гармоник на входе фильтра при работе тягового преобразователя частоты на один и на два АТД (рис. 10). При этом в качестве возмущающего воздействия принято максимальное значение гармоник входного тока ТПЧ (рис. 9, б), полученное экспериментально.

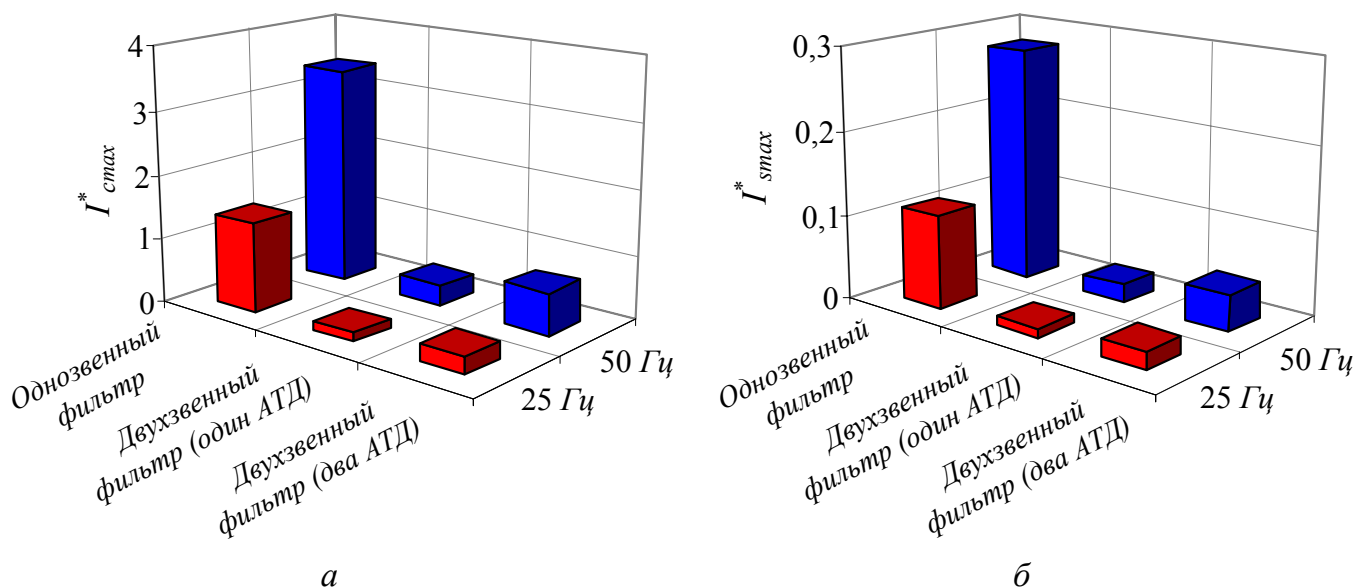


Рис. 10. Максимальные амплитуды гармонических составляющих тягового тока:  
а - непрерывные помехи; б - импульсные помехи

Приведенные трехмерные гистограммы (рис. 10) отражают высокую эффективность разработанного автором двухзвенного фильтра с резонансным контуром по сравнению с однозвенным фильтром испытываемого тягового привода.



**Заключение.** В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты.

1. Выполнен комплексный анализ причин отказов в работе рельсовых цепей и обоснована необходимость разработки методов и средств, снижающих влияние гармоник тягового тока электровозов, способное привести к ложному контролю свободности рельсовых цепей при их фактической занятости.

2. Отражена специфика использования известных методов и средств гармонического анализа тягового тока. Показано, что широко применяемые методы Фурье являются неэффективными для определения гармонического состава тягового тока, как сигнала с изменяющимся во времени частотным наполнением, и доказано, что наиболее приемлемым для практического использования является техника вейвлет – анализа.

3. Разработанный программный комплекс вейвлет – анализа дискретных сигналов позволяет оценить характер и степень электромагнитного воздействия отдельных элементов тягового электропривода ЭПС на технические средства и устройства систем железнодорожной автоматики.

4. Детально рассмотрены источники ЭМП в асинхронном тяговом электроприводе с импульсным регулированием. Выявлена природа возникновения помех и дана оценка негативного влияния каждого из элементов привода на гармонический состав тягового тока.

5. Получено выражение и определена требуемая величина коэффициента сглаживания, позволившая определить оптимальные параметры элементов двухзвенного LC – фильтра, на основе которого, разработана схема двухзвенного фильтра с резонансным контуром, обеспечивающего требуемый коэффициент сглаживания, при этом предложенный фильтр по своим массогабаритным показателям в  $\sqrt{3}$  раз меньше удовлетворяющего данным требованиям двухзвенного фильтра.

6. Амплитудно – частотная характеристика двухзвенного фильтра с резонансным контуром обеспечивает подавление гармоник тягового тока на частотах рельсовых цепей 25 и 50 Гц в 18,2 и 4,8 раза эффективнее, чем фильтров эксплуатируемых электровозов при тех же массогабаритных показателях.

7. Экспериментально установлена зависимость гармонических составляющих входного тока АИН от основной гармоники фазного тока двигателя. Зависимость показывает, что появление непрерывных кондуктивных помех вызвано наличием ЭДС вращения асинхронного тягового двигателя. Результаты экспериментов показали неэффективность использования входного однозвенного LC – фильтра в отношении обеспечения им электромагнитной совместимости ЭПС с рельсовыми цепями.

Дальнейшие исследования по рассматриваемой проблеме должны быть направлены на проработку норм и стандартов, ограничивающих уровень ЭМП, а также на совершенствование отдельных узлов и компонентов асинхронного тягового привода в целях обеспечения ЭМС электроподвижного состава с устройствами СЖАТ.

### **Основные работы, опубликованные по теме диссертации.**

1. Филипп В.Б., Щуров Н.И. Электромагнитная совместимость электроподвижного состава железнодорожного транспорта. // Электротехника. – 2007. - №9. – С. 35-40.
2. Филипп В.Б., Щуров Н.И. К вопросу расчета пассивного сглаживающего фильтра для тягового электропривода перспективного ЭПС с асинхронными тяговыми двигателями. // Транспорт: Наука, техника, управление. Науч. инф. сборник ВИНТИ. Москва: Изд-во ВИНТИ – 2008. - №6. – С. 9-12.
3. Филипп В.Б., Щуров Н.И. Вейвлет – анализ как метод оценки нестационарных процессов в электротранспортном комплексе. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. - №1. – С. 267-270.
4. Филипп В.Б. Вейвлет – преобразование как метод спектрального анализа тока контактной сети в установившихся режимах работы асинхронного тягового привода железнодорожного транспорта / В.Б. Филипп, Н.И. Щуров // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых 8-11 декабря 2005 г. в семи частях.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006 [2005]. Ч. 3. – С.214-216.
5. Филипп В.Б. Способ улучшения электромагнитной совместимости электроподвижного состава с другими частями электрического транспорта / В.Б. Филипп, В.С. Камоцкий, Н.И. Щуров // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых 8-11 декабря 2005 г. в семи частях.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006 [2005]. Часть 3. – С.216-218.
6. Филипп В.Б. Оценка влияния тягового тока асинхронного тягового привода на контактную сеть в установившихся режимах работы / В.Б. Филипп, Н.И. Щуров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Материалы докл. XII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 2-3 марта 2006 г.: в 3 т. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – Т.2. – 204-205.
7. Филипп В.Б. Исследование гармонического состава кривой тока контактной сети 3 кВ в установившихся режимах работы электровоза с асинхронным тяговым приводом работы / В.Б. Филипп, Н.И. Щуров // Транспортные системы Сибири: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции 24-25 ноября 2005г., Красноярск / Под ред. В.Н. Катаргина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – С.210-211.
8. Филипп В.Б. Вейвлет – преобразование как метод спектрального анализа тока в электрической сети нелинейной нагрузки // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов XII всероссийской научно – технической конференции (6-8 декабря 2006 г.) - Томск: Изд-во ТПУ, – 2006. – С.53–56.
9. Филипп В.Б., Щуров Н.И. О применении вейвлет – анализа для оценки нестационарных процессов электротранспортного комплекса // Электротехника, электромеханика, электротехнологии: Материалы докладов III всероссийской научно – технической конференции с международным участием (26-28 октября 2007 г.) - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С.116-120.
10. Филипп В.Б., Щуров Н.И. Вейвлет – преобразование как метод спектрального анализа тока тяговой сети в системе электрического транспорта // Сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. - №3(45). – С.79-84.

Подписано в печать .10. 2008. Формат 84x60x1/16  
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Печ.л. 1  
Заказ №

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20