

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Межвузовский сборник научных трудов

Москва — 2015

УДК 621.313.323

**ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ТЯГОВЫХ ТОКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ
ДОРОГ**

Назаров Н.С.¹, Назаров О.Н.²

¹Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

²ОАО «ВНИИЖТ»

Статья обобщает опыт проведения измерений спектрального состава тягового тока электровозов и электропоездов при приемочных и сертификационных испытаниях на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости с рельсовыми цепями. Представлены основные методические подходы к выбору оборудования и формированию измерительных каналов, учитывающие условия и особенности испытаний электроподвижного состава железных дорог.

В современных схемах бесколлекторного, преимущественно асинхронного, тягового двигателя магнитная связь между обмоткой ротора и статором, обтекаемым несинусоидальным током, вносит существенные особенности в электромагнитные процессы, что необходимо учитывать при анализе электромагнитной совместимости электроподвижного состава (ЭПС) с рельсовыми

ми цепями СЦБ и АЛС, а также с продольными проводными линиями связи [1]. К современному ЭПС с полупроводниковыми преобразователями предъявляются требования по электромагнитной совместимости (ЭМС), соответствие которым подтверждается испытаниями.

Объектом испытаний могут быть силовые и вспомогательные статические преобразователи электровозов, электропоездов, пассажирских вагонов или других железнодорожных объектов, получающих питание от тяговой сети постоянного тока напряжением 3 кВ или переменного тока напряжением 25 кВ частотой 50 Гц. Основными нормируемыми показателями являются предельные амплитуды (действующие значения) спектральных составляющих входного тока объекта $I_{TC}(f)$, совпадающих с сигнальными частотами СЦБ и АЛС или близких к ним, а также продолжительность их действия.

Нормируемые показатели. Нормативный документ, принятый в настоящее время в качестве основного при сертификации подвижного состава по показателям ЭМС, ГОСТ Р 55176.3.1 устанавливает допустимые значения гармонических составляющих тока электровоза или электропоезда [2], которые приведены в таблице 1.

При испытаниях электровоза или электропоезда измерения гармонических составляющих тока производят в квазиустановившихся режимах работы электрооборудования при консольном электроснабжении подвижного состава от одной тяговой подстанции на двухпутном участке. При переменном токе длина консоли должна быть 25 км, при питании от постоянного тока – 1,5 км.

Гармонические составляющие тягового тока необходимо определять с помощью динамического спектрального анализа, результатом которого является дискретный спектр усредненных (за время 300 мс) значимых гармонических составляющих в полосе частот от 5 до 6000 Гц. При испытаниях возможно применение промышленно выпускаемых анализаторов спектра, но они не всегда учитывают специфику измерений на железнодорожном транспорте.

Применение компьютеризированных измерительных систем позволяет представлять измеренный сигнал в виде дискретной по амплитуде и квантованной по времени функции $x(t)$ со стабильным шагом квантования Δt , которая определена на отрезке времени длительностью T . При этом $x(t)$ будет представляется в виде упорядоченного массива из $N=T/\Delta t$ измеренных мгновенных значений x_n , где $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ — порядковый номер значения в массиве. Данное представление исследуемого сигнала во времени, которое мы будем называть "кадром", обычно используется для его преобразования в частотную форму $X(f)$ с помощью дискретных преобразований Фурье.

Датчики сигналов, измерительная схема, параметры канала измерения и математический метод, используемые в процессе измерений должны обеспечить точность, достаточную для определения нормируемых показателей.

Таблица 1

Допустимые значения величины гармонических составляющих тока

Система тягового электроснабжения (напряжение/род тока/частота)	Номинальная частота сигнального тока устройств СЦБ и АЛС, Гц	Полоса частот, Гц	Допустимое действующее значение спектральных составляющих тока в полосе частот*, А, не более
3 кВ постоянного тока	25	19..21	11,6
		21..29	1,0
		29..31	11,6
	50	40..46	5,0
		46..54	1,3
		54..60	5,0
	4545	4507..4583	0,2
	5555	5517..5593	0,2
25 кВ переменного тока 50 Гц	25	15..21	4,1
		21..29	1,0
		29..35	4,1
	75	65..85	4,1
	4500	4462..4538	0,2
	5500	5462..5538	0,2
3 кВ постоянного тока и 25 кВ переменного тока 50 Гц	175	167..184	0,4
	420	408..432	0,35
	480	468..492	0,35
	580	568..592	0,35
	720	708..732	0,35
	780	768..792	0,35
	5000	4962..5038	0,2

Примечание: * – Указан уровень действующего значения, рассчитанный сразу для всех гармонических составляющих, одновременно присутствующих в полосе, с длительностью возмущения более 0,3 с.

Датчики тока, измерительная схема. При испытании полупроводниковых преобразователей, получающих питание от тяговой сети переменного тока, всем требованиям удовлетворяют датчики тока, работающие на основе эффекта Холла, например описанные в [3]. Подобные датчики широко распространены, выпускаются в нашей стране и за рубежом, наиболее распространены датчики производства компании LEM. Из имеющегося типоразмерного ряда датчики должны быть подобраны в соответствии с рекомендациями изготовителя, учитывая допустимую амплитуду тока и частотный диапазон.

Датчик измерения тока устанавливается в первичной обмотке тягового трансформатора ЭПС или в цепях отсоса тягового тока вблизи шин тяговой подстанции.

В преобразователях, питающихся от тяговых сетей постоянного тока, анализируемая амплитуда переменной составляющей входного тока может быть в 100-1000 раз меньше величины постоянной составляющей. Поэтому целесообразно разделить измерение такого сигнала на два измерительных канала с различными коэффициентами усиления. В качестве датчика постоянной составляющей также можно использовать датчики тока с эффектом Холла.

Измерение относительно малых значений переменной составляющей постоянного тока требует особой тщательности при измерениях, т.к. возрастает возможность искажения реального сигнала помехами и другими случайными факторами. Возможны два варианта проведения измерений: прямое и косвенное.

При прямом измерении рекомендуется использовать датчики, принцип действия которых основан на использовании катушки Роговского. Например, датчики производства компании РЕМ типа CWT обеспечивают передачу переменной составляющей тока в диапазоне частот выше 0,5 Гц при величине постоянной составляющей до 6 кА и имеют соответствующую изоляцию. Возможен вариант измерения и датчиками тока LEM. При этом сигнал с измерительного резистора $R_{изм}$, подключенного к выходу датчика подается на вход измерительного прибора через дифференцирующую C_d - R_d цепочку с постоянной времени $\tau = C_d(R_d + R_{изм})$, которая должна быть больше периода T . Необходимо учитывать также величину входного сопротивления измерительного прибора, подключенного параллельно R_d . Предложенная конфигурация измерительного канала с датчиком LEM выделяет переменную составляющую сигнала. При правильном подборе параметров дифференцирующей цепочки можно добиться полосы пропускания измерительного канала от 1 Гц и выше.

Для снижения воздействия на рельсовые цепи и устройства АЛС на э.п.с. постоянного тока устанавливается входной LC-фильтр нижних частот. Косвенный метод измерения заключается в измерении тока $i_d(t)$ на выходе такого фильтра, спектрального анализа осциллограммы и вычисления спектрального состава тока в тяговой сети с использованием амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. Так как амплитуда переменной составляющей тока $i_d(t)$ сравнительно велика и, соответственно, погрешность измерительного канала уменьшается, то появляется возможность измерения без применения дополнительных дифференцирующих цепочек.

Рассмотрим упрощенную схему замещения входного фильтра э.п.с. постоянного тока при определении АЧХ (рис. 1.). Параметры фильтра определяются индуктивностью дросселя L_ϕ , его активным сопротивлением R_ϕ и емкостью конденсатора C_ϕ . Фильтр всегда подключен к тяговой сети индуктивностью L_C и активным сопротивлением R_C . В процессе перемещения э.п.с. по участку пути, АЧХ фильтра из-за наличия распределенной индуктивности и сопротивления контактной сети изменяется в соответствии с расстоянием от

э.п.с. до тяговой подстанции и становится самой неблагоприятной в случае, когда э.п.с. расположен в непосредственной близости к шинам тяговой подстанции ($L_C=0$, $R_C=0$). Резонансная частота фильтра f_0 и его добротность d при этом определяются выражениями:

$$f_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{L_\phi C_\phi}},$$

$$d = \frac{R_\phi}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_\phi}{L_\phi}}.$$

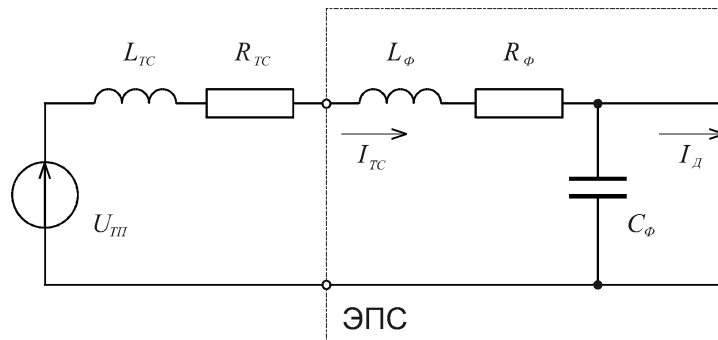


Рис. 1. Упрощенная расчетная схема замещения входного LC-фильтра.

АЧХ фильтра $A(f)$ в этом случае:

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(\left(1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right)^2 + 4d^2 \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right)}},$$

а спектральный состав тока тяговой сети $I_{TC}(f)$ определяется из спектрального состава тока $I_d(f)$:

$$I_{TC}(f) = A(f) \cdot I_d(f).$$

Используя такой подход, возможно проведение математического анализа влияния характеристик тяговых подстанций и распределенных параметров тяговой сети на спектральный состав тока $I_{TC}(f)$.

Особенностью данного метода является минимальное присутствие составляющих, генерируемых тяговой подстанцией с частотами 100, 300, 600, 900 Гц и т.д., что позволяет выделить спектральные характеристики объекта испытаний из общего спектра. Такая возможность бывает необходима в случаях, когда спектральные составляющие пульсации сетевого тока, вызванные пульсацией напряжения тяговой сети, значительно превышают измеряемые показатели преобразователей, как правило, при испытаниях статических преобразователей пассажирских вагонов или собственных нужд э.п.с.

Для преобразователей, установленных на стенде, возможно получение аналогичного результата прямым измерением, при этом необходимо подавать питание на объект испытаний через дополнительный фильтр, который практически исключает пульсацию сетевого напряжения.

Параметры измерительного канала. Как уже отмечалось, представление сигнала $x(t)$ в функции времени посредством математической обработки преобразуется в частотное $X(f)$ с помощью преобразования Фурье:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1).$$

Результатом дискретного преобразования функции, определенной на отрезке $[0, T]$, является упорядоченный массив данных $X(f)$, состоящий из амплитуд (или действующих значений) X_k -составляющих исходного сигнала $x(t)$, соответствующих частотам $f_k = k/T$, где $k=0, 1, 2, \dots, N/2$:

$$X_k^* = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi \frac{nk}{N} \Delta t},$$

$$X_k = \sqrt{\operatorname{Re}(X_k^*)^2 + \operatorname{Im}(X_k^*)^2}.$$

Очевидно, что результирующая функция $X(f)$ дискретна по частоте и амплитуде. Дискретность по частоте Δf определяется из длительности кадра зависимости $\Delta f = 1/T$. Диапазон частот, в котором определена $X(f)$, сверху ограничивается частотой $f_{\max} = N/2T$. Дискретность по амплитуде определяется в основном разрядностью r аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Например, на электропоездах переменного тока при действующем значении первичного тока секции в номинальной точке порядка 50-60 А необходимо обеспечить измерение спектральных составляющих тока амплитудой 0,28 А с абсолютной погрешностью не менее 0,02 А. В этом случае требуемая разрядность АЦП с числом значащих бит равном 1 определяется как $r \geq \log_2(60/0,02) = 12$, что соответствует динамическому диапазону 72 дБ. В некоторых случаях возможно потребуются применение 14- или 16-разрядных АЦП. При выборе АЦП следует учитывать, что одним из важнейших параметров устройств АЦП наряду с разрядностью является значение последнего значащего бита (LSB), характеризующее точность преобразования в статических и динамических режимах. Опасность игнорирования этого параметра может привести к тому, что из выходного 16-разрядного кода АЦП реально будут нести информацию только 12. Для целей измерений спектрального состава токов приемлемой величиной LSB следует считать значения от 0,5 до 1.

При прямом измерении входного тока э.п.с. постоянного тока при расчетной величине постоянной составляющей тока 1000 А необходимо применение АЦП с $r \geq \log_2(1000/0,02) = 16$. Разделение измерительных каналов постоянной и переменной составляющих, как описано выше, позволяет снизить требование к разрядности АЦП и повысить динамический диапазон измерительного канала.

Параметры измерительного канала должны выбираться из условия обеспечения точности, достаточной для сравнения результатов с требованиями, то есть спектральный состав сигнала должен определяться с абсолютной погрешностью измерения частоты не выше 1 Гц в диапазоне частот 5..6000 Гц с абсолютной погрешностью измерения амплитуды не менее 0,02 А.

Для определения параметров измерительного канала необходимо принимать во внимание, что, согласно теоремы отсчетов Котельникова, непрерывный сигнал полностью определяется последовательностью своих значений с шагом квантования по времени $\Delta t = 1/2f_m$, где f_m – наивысшая частота в спектре непрерывного сигнала. Это означает, что частота квантования измеряемого сигнала должна быть не менее, чем в два раза выше наивысшей частоты, присутствующей в спектре. Игнорирование этого условия приводит к существенному искажению цифрового представления сигнала по сравнению с оригиналом, в спектре такого сигнала появляется ряд ложных частотных составляющих. А так как до проведения измерений спектральный состав сигнала обычно неизвестен, то для предотвращения указанного явления обычно применяются специальные измерительные фильтры нижних частот с частотой среза ниже частоты измерения. Применение этих фильтров вносит незначительные искажения в спектр сигнала из-за неравномерности их АЧХ. Допустимыми для целей испытаний можно считать фильтры с частотой среза f_m , диапазон частот которых, передаваемых с погрешностью менее $\pm 0,025$ дБ, составляет $0..0,832 f_m$.

Таким образом, параметры системы измерения должны обеспечивать измерение тока э.п.с. за время 300 мс. Частота измерения при наличии фильтра с частотой среза не менее 7250 Гц должна быть более 14500 Гц. АЦП должен обеспечить динамический диапазон не менее 72 дБ.

Спектральный анализ. Как отмечалось выше, для проведения спектрального анализа обычно применяют дискретные преобразования Фурье (ДПФ), однако алгоритм ДПФ при расчетах отнимает значительные ресурсы процессора и памяти ЭВМ. Для ускорения вычислений и обеспечения возможности проведения спектрального анализа в реальном масштабе времени обычно используются алгоритмы быстрых преобразований Фурье (БПФ), суть которых сводится к многократному парному членению исходного сигнала на более короткие последовательности вплоть до получения простейших двухэлементных последовательностей. Определив ДПФ простейших пар отсчетов, определяется ДПФ четырехэлементных и т.д. до восстановления полного спектра сигнала. Для выполнения алгоритма БПФ требуется, чтобы выборка N обрабатываемого кадра была степенью числа 2 в отличие от алгоритма ДПФ, где она может быть выбрана произвольно. Выигрыш во времени выполнения преобразования сокращается примерно в $N/\log_2 N$ раз, что при $N=2^{14}=16384$ достигает 1200.

Существует множество алгоритмов БПФ, отличающихся друг от друга, как быстродействием, так и требуемыми ресурсами ЭВМ. В современных измерительных системах применяются алгоритмы, известные под наименованиями "Radix-4", "Radix-8" и "Split-Radix".

Применение алгоритмов ДПФ и БПФ может привести к возникновению ошибок. Если непрерывная функция $x(t)$, определенная, как того требует теория Фурье, на бесконечном интервале времени $t \in [-\infty, \infty]$ (см. формулу 1), из-

вестна только в ограниченном интервале $[0, T]$, то это равносильно умножению функции $x(t)$ на некоторую функцию $w_1(t)$, где:

$$w_1(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \in [0, T], \\ 0, & \text{если } t \notin [0, T]. \end{cases}$$

Усечение $x(t)$ прямоугольной функцией приводит к представлению всех спектральных составляющих в виде одного главного лепестка и нескольких дополнительных боковых лепестков с затухающей амплитудой, т.е. к эффекту, называемому "растеканием спектра" [4]. В случаях, когда длительность кадра T дискретного сигнала кратна периоду всех составляющих его спектра, все спектральные составляющие совпадают с главными лепестками разложения непрерывной функции и этот эффект не наблюдается. Применение ДПФ допускает изменение длительности кадра между процедурами измерения и математической обработки, поэтому имеется возможность добиться достаточно точного частотного представления сигнала. Однако, это не всегда приводит к желаемому результату по причинам, указанным ниже.

Во-первых, основная частота колебаний может отличаться от ожидаемой. Например, частота напряжения сети 50 Гц имеет допуск и может изменяться в диапазоне 49..51 Гц, а в системах с вращающимися генераторами или с частотно-регулируемыми инверторами даже в больших пределах.

Во-вторых, в спектре исследуемого сигнала могут присутствовать составляющие с частотами, не находящимися в гармонической связи. Так в спектре входного тока э.п.с. присутствуют гармонические ряды, источником которых являются тяговая подстанция, силовой преобразователь э.п.с. и его система управления, статический преобразователь собственных нужд, процессы в механической части тягового привода и комбинационные частоты, появляющиеся в результате взаимодействия указанных рядов друг с другом. В таком случае найти минимально возможную величину T , находящуюся в гармонической связи со всеми рядами частот чрезвычайно сложно и практически не возможно.

В-третьих, на э.п.с. с частотно-регулируемыми преобразователями бывает сложно определить основную частоту регулирования до проведения спектрального анализа.

Применение же алгоритмов БПФ вообще допускает возможность негармонического изменения периода T только с помощью изменения частоты измерения.

Указанные причины приводят к возникновению эффекта "растекания спектра", что может привести к потере части спектральных составляющих. Чтобы избавиться от явления, необходимо преобразовать функцию $w_1(t)$, называемую прямоугольным окном данных, таким образом, чтобы усилить главный лепесток, а амплитуды боковых лепестков уменьшить по абсолютной величине, что приведет к локализации энергии на центральной частоте, уменьшая ее "утечку" в боковые лепестки и тем самым превращая эффект "растекания" из неконтролируемого в управляемый.

Существует четыре семейства функций окон данных: алгебраическое (прямоугольное, треугольное, параболическое и пр.), косинусоидальное, гауссово и корреляционных окон Хемминга. Наибольшее распространение в представляемой области измерительной техники получило окно данных Ханна из семейства косинусоидальных окон:

$$w_h(t) = 2 \cdot (0,5 - 0,5 \cdot \cos(\frac{2\pi t}{T}))$$

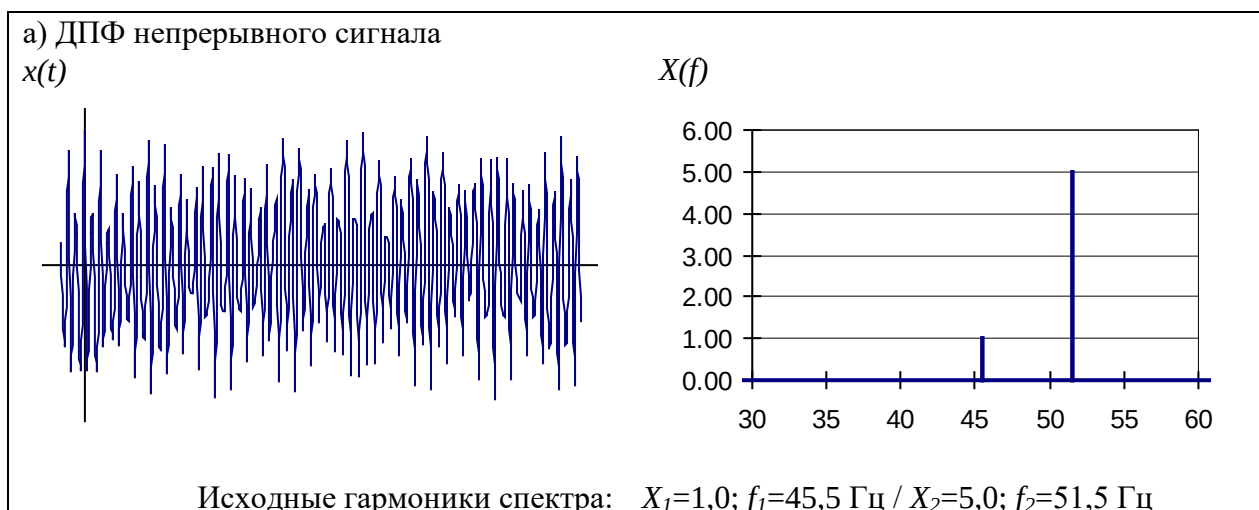
Выбор конкретного вида окна данных зависит от задачи исследования и характера исследуемого сигнала [5]. Окно Ханна из-за универсальности своих параметров в основном удовлетворяет потребностям измерений на подвижном составе. Применение окон данных вносит дополнительную погрешность в спектральный состав. Для окна Ханна погрешность по амплитуде в самых неблагоприятных случаях составляет менее 1,42 дБ, а погрешность по частоте из-за "растекания спектра" составляет $1,44\Delta f$. Однако, благодаря тому, что форма лепестка известна, имеется возможность точного определения частоты и амплитуды составляющих спектра. Если локальный максимум спектра соответствует k -ой составляющей спектра, то истинные значения частоты f'_k и амплитуды X'_k максимума определяются по формулам:

$$f'_k = \frac{\sum_{i=k-m}^{k+m} (X_i \cdot f_i)}{\sum_{i=k-m}^{k+m} (X_i)}, \quad X'_k = \frac{\sum_{i=k-m}^{k+m} (X_i)}{b_w \sqrt{2}},$$

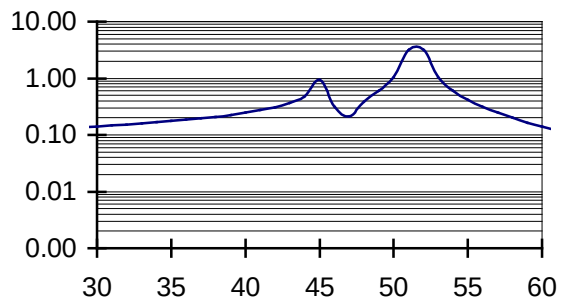
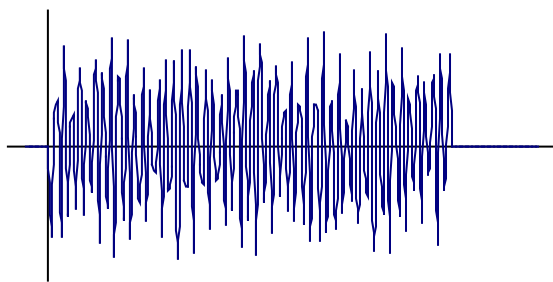
где m – максимальное число составляющих, попадающих на один лепесток и включающих не более одного локального максимума (в большинстве случаев $m=3$);

b_w – коэффициент мощности шума окна (для окна Ханна $b_w = 1,5$).

На рис. 2. представлены варианты определения спектрального состава тестового сигнала $x(t)$, содержащего две гармонические составляющие с частотами 45,5 Гц амплитудой 1,0 и 51,5 Гц амплитудой 5,0: реальный спектр (а), спектр сигнала, полученный методом БПФ с прямоугольным окном данных (б) и спектральный состав с применением БПФ и окна данных Ханна (в).

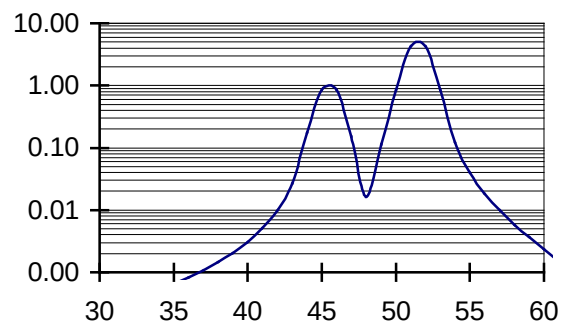
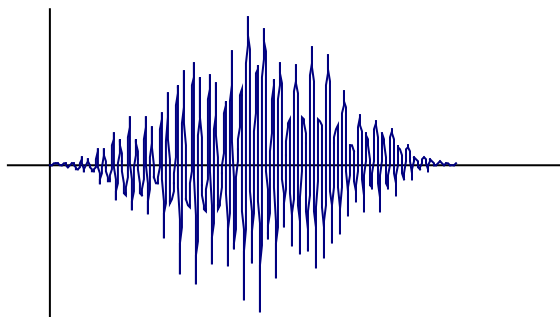


б) БПФ с прямоугольным окном данных
 $x(t) \cdot w_1(t)$



Результат измерений гармоник спектра: $X_1=0,92$; $f_1=45,0$ Гц / $X_2=3,18$; $f_2=51,0$ Гц

в) БПФ с окном данных Ханна
 $x(t) \cdot w_h(t)$



Результат измерений гармоник спектра:

- локальный максимум $X_1=0,86$; $f_1=46,0$ Гц / $X_2=4,24$; $f_2=52,0$ Гц
 - истинный максимум $X'_1=1,03$; $f'_1=45,6$ Гц / $X'_2=5,0$; $f'_2=51,44$ Гц

Рис. 2. Варианты проведения спектрального анализа: непрерывного сигнала (а), сигнала, определенного методом БПФ на интервале времени с прямоугольным окном данных (б) и с применением окна данных Ханна (в)

Представленный тестовый пример использования описанных методов цифровой обработки сигналов наглядно демонстрирует погрешности измерений амплитуды и частоты при их использовании.

Развитие методов спектрального анализа. Как известно, теория Фурье применима к периодическим сигналам, которые определены в бесконечном интервале времени $t \in [-\infty, \infty]$ и имеют период T . При практических измерениях гармонического состава тягового тока ЭПС можно наблюдать более сложную картину, не всегда имеется возможность получить квазиустановившиеся режимы работы оборудования подвижного состава. Для примера на рис. 3. представлена одна из реализаций спектрального состава входного тока секции

электropоезда переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями, питающимися от инвертора тока. При этом в процессе измерений каждая гармоническая составляющая в спектральном составе сигнала как правило связана с определенным источником и непрерывно изменяется по частоте, амплитуде и фазе в зависимости от изменения внешних факторов, таких как скорость движения подвижного состава, напряжение и частота в тяговой сети, регулировочные процессы системы управления, алгоритмы регулирования АТД при питании от инвертора.

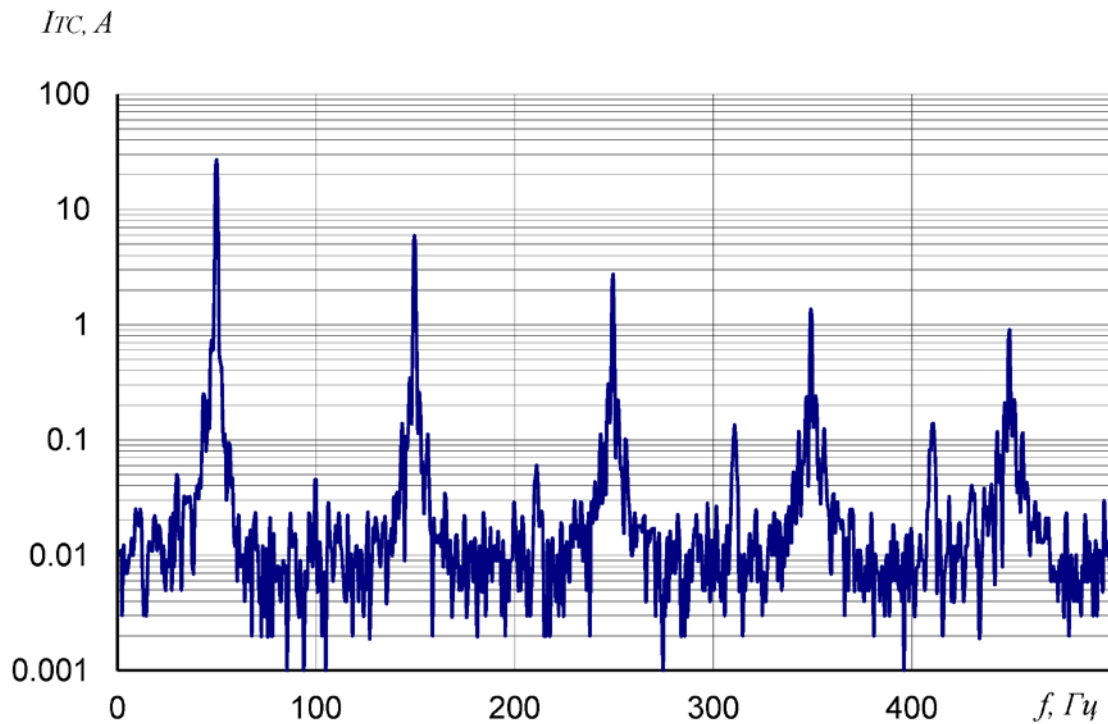


Рис. 3. Низкочастотная часть спектра входного тягового тока секции электропоезда переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями (действующие значения).

Некоторые гармонические составляющие могут появляться в кадре случайно, являясь следствием какого-либо краткосрочного переходного процесса, например отрыва токоприемника или пробоксовки колесной пары. Эти гармоники не должны приниматься во внимание при оценке результатов измерения.

Учитывая, что устройства АЛС и СЦБ имеют кодовую защиту на сигнальных частотах и задержку времени срабатывания путевого реле около 300 мс, интерес представляет не только сам факт появления в спектре тока составляющих с частотами, близкими к сигнальным, но и их время "жизни".

Для решения этой задачи необходимо представить спектральный состав тока как функцию времени $I_{TC}(f,t)$ и применить метод непрерывного измерения исследуемого сигнала с дальнейшей разбивкой его на кадры длительностью 300 мс, к каждому из которых можно будет применить описанные выше алгоритмы цифровой обработки сигналов.

Имеются и другие методы. В конце 80-х годов с появления теории "маленьких волн" Морлета началось бурное развитие теории частотно-временного представления сигналов. В настоящее время это направление известное под термином вейвлет-анализа активно используется в некоторых областях техники: при оценке динамических свойств механических систем, в аэродинамике, при анализе речевых сообщений в системах идентификации голоса и в некоторых других [6]. Появились сообщения и об использовании вейвлет-анализа электрических процессов на подвижном составе железных дорог [7]. Наиболее перспективное применение данной методики ожидается при анализе токов движущегося с ускорением частотно-регулируемого ЭПС и при анализе переходных процессов с точки зрения влияния на устройства АЛС и СЦБ, а также для анализа резонансных явлений в комплексных электромеханических системах. Однако вопрос определения параметров канала цифровой обработки сигналов ЭПС требует дополнительного изучения.

При практических измерениях для исключения ошибок при обработке результатов измерений целесообразно совместно с описанными применять также метод имитации работы путевого реле. Для этого формируется математическая модель, состоящая из нескольких цифровых фильтров с характеристиками, максимально приближенными к параметрам и алгоритмам работы входных цепей путевых реле. Математическую модель дублируют также физическим устройством.

Таким образом, описанная совокупность измерительных средств, методов измерения и цифровой обработки сигналов позволяет обеспечить оценку показателей ЭМС электроподвижного состава с рельсовыми цепями СЦБ и АЛС с достаточной точностью.

Список использованной литературы

1. Кучумов В.А., Княжева А.С. Гармонический анализ входного тока электровоза с широтно-импульсным регулированием напряжения на асинхронном двигателе // Вестник ВНИИЖТ. 2012. Вып.2. – с.15-18.
2. ГОСТ Р 55176.3.1-2012 (МЭК 62236-3-1:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Подвижной состав. Требования и методы испытаний, 2012 г.
3. Современные средства измерения и обработки информации для испытаний электропоездов и высоковольтного оборудования пассажирских вагонов / Б.И. Хомяков, О.Н. Назаров, Д.М. Самарец // В сборнике науч. тр. ВНИИЖТ «Совершенствование электрооборудования электропоездов и высоковольтного оборудования пассажирских вагонов» под ред. Г.Г. Гомолы. – М.: 1993. – с.119-125.
4. Гоноровский И.С., Демин М.П. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь. 1994. – 480 с.
5. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. О.И. Хабарова, Г.А. Сидоровой / Под ред. И.С. Рыжака. – М.: Мир, 1990.

6. О.В. Нагорнов и др. Вейвлет-анализ в примерах: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.

7. Фадеева Т.М. Применение вейвлет-анализа для исследования гармонического состава тягового тока ЭПС / В сборнике науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» «Совершенствование электрооборудования тягового подвижного состава» под ред. В.А. Кучумова, Н.Б. Никифоровой. – М.: Интекст. 2011. – с.96-100.

Ключевые слова: *электровоз, электропоезд, спектральный анализ, электромагнитная совместимость, рельсовые цепи*

PARTICULAR DIGITAL METHODS OF SPECTRUM ANALYSIS OF RAILWAY ROLLING STOCK TRACTION CURRENT

Nikolay S. Nazarov¹, Oleg N. Nazarov²

¹Moscow state university of railway engineers (MIIT)

²Railway Research Institute (JSC “VNIIZhT”)

The article summarizes the experience in measuring of the traction current spectrum during the acceptance and certification electric locomotives and EMU tests on EMC with rail circuits.

The main methodological approaches to the measurement equipment and channels architecture choice are presented taking into account the conditions of loco and EMU tests.

Keywords: *electric locomotive, electric multiple unit train, spectrum analysis, electromagnetic compatibility, rail circuits*

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Межвузовский сборник научных трудов

Статьи печатаются в авторской редакции

Тип. заказ

Тираж 80 экз.

Подписано в печать 07.07.2015

Гарнитура Times New Roman

Формат 60×90 ¹/₈

Усл. печ. л. 33.5

Информационно-издательский отдел

Информационно-методическое управление РОАТ

125993, Москва, часовая ул., 22/2