

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАРМОНИК ТЯГОВОГО ТОКА ЭЛЕКТРОВОЗА НА РАБОТУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Введение

В настоящее время на железных дорогах Украины сложилась ситуация характеризующаяся тем, что устройства, обеспечивающие безопасность движения поездов, в частности, рельсовые цепи (РЦ) и автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС), работают неустойчиво, что сопровождается сбоем кодов АЛС. В ряде случаев причиной возникновения отказов является наличие опасных и мешающих гармоник в обратном тяговом токе. Влияние тягового тока на работу РЦ и систему АЛС объясняется использованием рельсовых линий в системах автоблокировки, тягового электроснабжения на электрифицированных железных дорогах и метрополитенах. В результате помехи, возникающие в контактной сети и локомотиве, могут появляться на входе приемников устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) гальваническим путем или индуктивно.

Электромагнитная ситуация на железнодорожном транспорте осложняется и тем, что здесь, как и в других сферах хозяйственной деятельности, наметилась тенденция к внедрению оборудования, построенного на современной микроэлектронной элементной базе (микропроцессорные устройства автоблокировки, электрической и диспетчерской централизации), что сопровождается снижением уровней полезных сигналов. С другой стороны, введение в эксплуатацию новых типов подвижного состава с тиристорной системой управления и асинхронными двигателями вызывает расширение спектрального состава помех тягового тока, а также увеличение их уровней.

Все это, вызывает необходимость оценивать электромагнитную обстановку вводимых в эксплуатацию и переоборудуемых

железнодорожных участков с целью предупреждения появления отказов в РЦ и системе АЛС, вызванных помехами обратного тягового тока.

Таким образом, проведение комплексных исследований электромагнитных процессов в рельсовых цепях является актуальной задачей, которая включает в себя разработку математической модели системы тягового электроснабжения с целью научного обоснования метода автоматизированного измерения помех с вагона-лаборатории и изучения вопроса распространения гармоник обратного тягового тока, вызванных работой оборудования локомотивов и системы тягового электроснабжения, по длине фидерной зоны.

Методика измерения помех

Для оценки гармонического спектра тока в рельсах, т. е. определения частот гармонических составляющих сигнала, амплитуд этих гармонических составляющих и их начальных фаз была разработана методика, которая предполагает запись и анализ сигнала с катушек автоматической локомотивной сигнализации или приемных катушек ПК1, ПК2 во время контроля параметров кодов АЛС. Электродвижущая сила, наведенная в катушках АЛС пропорциональна кодовому и тяговому току, протекающему в рельсах. Для оценки спектрального состава тока была использована теория Фурье о возможности разложения любого процесса в бесконечную, но счетную сумму отдельных гармонических составляющих.

Поскольку в обратном тяговом токе могут присутствовать как периодические, так и непериодические процессы $x(t)$ было использовано прямое преобразование Фурье-изображения:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi f t} dt. \quad (1)$$

Замена процедуры интегрирования суммированием дает возможность применять прямое преобразование Фурье-изображения как для стационарных, так и произвольных колебаний. При этом непрерывный интеграл заменяется суммой площадей прямоугольников, одна из сторон которых равна дискрету по времени Δt , а вторая мгновенному значению процесса в соответствующий момент времени. Непрерывное время было заменено его дискретным значением $(m-1) \cdot \Delta t$, где m - номер точки от начала процесса, дифференциал dt - ограниченным приращением времени Δt . В результате непрерывное значение частоты f заменяется дискретными значениями $(k-1) \cdot \Delta f$, где k - номер значения частоты, $\Delta f = \frac{1}{T}$ - дискрет частоты, а T - промежуток времени, на котором задан процесс. В результате прямое преобразование Фурье вычисляется по формуле:

$$y(k) = \sum_{m=1}^n x(m) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot (m-1) \cdot (k-1) / n}, \quad (2)$$

где n - число точек в которых задан процесс, $n = \frac{1}{\Delta f \cdot \Delta t}$ [1, 2].

Алгоритм исследования сигнала, снятого с локомотивных катушек, представленный на рис. 1, который включает в себя выполнение следующих операций: оцифровка аналогового сигнала пропорционального току, протекающему в рельсах; спектральный анализ сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье; архивирование данных и графическое представление результатов эксперимента.

По результатам исследований, проведенных на железнодорожном участке Днепропетровск – Нижнеднепровск Узел Приднепровской железной дороги с электротягой постоянного и полученных с помощью разработанной методики, в рельсовых линиях были зафиксированы гармоники частотой 50, 75, 100, 150 Гц амплитудой 0,1...1.5 А.

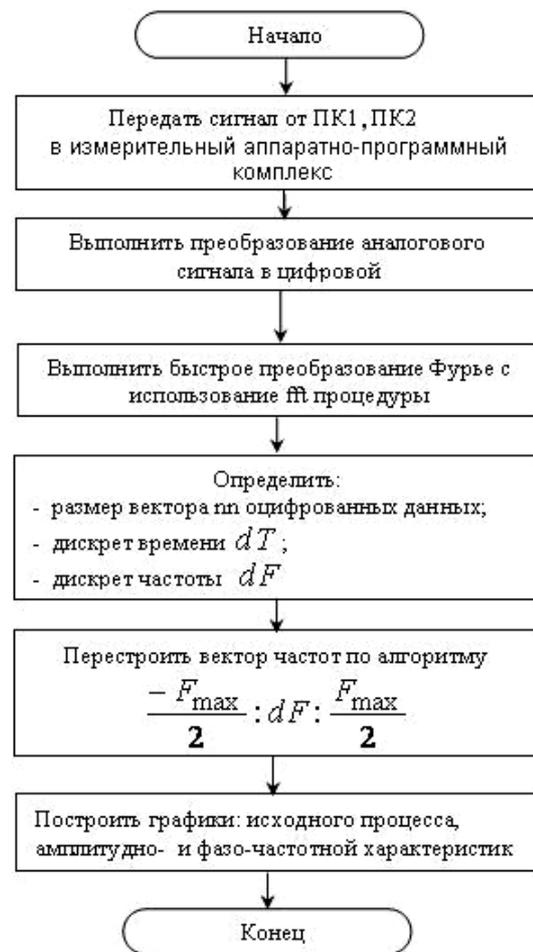


Рис. 1. Упрощенный алгоритм исследования амплитудно- и фазочастотной характеристик сигнала

Наиболее опасной среди упомянутых выше является гармоническая составляющая частотой 50 Гц, поскольку она совпадает с кодовой несущей, используемой в кодовых рельсовых цепях. Амплитуда гармоники 50 Гц достигала 1 А. При выполнении измерений сигнал был записан отдельно от каждой из локомотивных катушек и представлял собой сумму кодового и тягового тока. Спектральный анализ был выполнен для сигнала, записанного в паузе кода «З». Причем помеха частотой 50 Гц в паузе кода достигала значительной величины (до 50 % от полезного сигнала). Остальные гармоники отсутствовали [1, 3, 4].

Проведенные экспериментальные исследования подчеркивают необходимость разработки теории, позволяющей оценить распределение гармоник тягового тока по длине фидерной зоны с целью выявления

опасных помех, которые могут привести к ложному срабатыванию путевого приемника рельсовых цепей.

Математическая модель

С целью учета влияния всех видов помех на работу рельсовых цепей, а также научного обоснования метода автоматизированного измерения электромагнитных помех в рельсовых линиях, была разработана комплексная математическая модель их распространения в системе тягового электроснабжения.

Для решения данной задачи была уточнена схема замещения электрических тяговых сетей таким образом, чтобы стало возможным учитывать как можно большее число факторов, влияющих на распределение гармоник тока и напряжения в них, определить источники помех, оказывающие влияние на передачу сигнальных токов по рельсовым цепям; теоретически проанализировать распределение гармоник напряжения и токов по длине фидерной зоны, зная спектральный состав тягового тока, определен экспериментально.

Исследование распространения по длине фидерной зоны гармоник тягового тока электровоза является достаточно актуальной задачей, поскольку рельсы используются в качестве обратной линии на электрифицированных участках, а спектральный состав обратного тягового тока значительно расширился вследствие применения новых типов подвижного состава и износа оборудования существующего.

В случае, если источником гармоник является электрический двигатель или другое оборудование электровоза, а тяговую сеть принять однородной, удобно пользоваться схемой замещения, представленной на рис. 2. При разработке модели были использованы литературные источники [4].

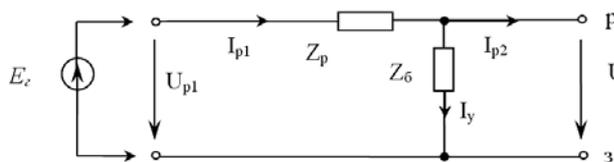


Рис. 2. Схема замещения однородной рельсовой сети

Внутренним сопротивлением источника гармоник ввиду его малости пренебрегаем. Поскольку рельсовую сеть считаем однородной, то заменим ее одним четырехполюсником. Описать электромагнитные процессы в рельсовой сети можно с помощью уравнений

$$\dot{U}_{p1} = \dot{E}_z, \quad (3)$$

где \dot{U}_{p1} - потенциал рельса возле электровоза (в начале рельсовой сети), В;

\dot{E}_z - электродвижущая сила гармоник, В.

С другой стороны потенциал рельса можно определить как

$$\dot{U}_{p1} = \dot{I}_{p1} \cdot Z_p + \dot{U}_{p2}, \quad (4)$$

где \dot{I}_{p1} - ток гармоник в начале рельсовой сети, А; Z_p - сопротивление рельсовой линии, Ом. $Z_p = z_p \cdot l$, где z_p - удельное сопротивление рельсовой сети, Ом/км, l - расстояние между источником гармоник (электровозом) и тяговой подстанцией, км.

Потенциал рельса \dot{U}_{p2} в конце рельсовой сети (вблизи тяговой подстанции) может быть найден как

$$\dot{U}_{p2} = \dot{I}_y \cdot Z_6, \quad (5)$$

где \dot{I}_y - ток утечки через балласт, А;

Z_6 - сопротивление балласта, Ом.

Ток в начале рельсовой сети \dot{I}_{p1} представляет собой

$$\dot{I}_{p1} = \dot{I}_y \cdot \dot{I}_{p2}, \quad (6)$$

где \dot{I}_{p2} - ток гармоник в конце рельсовой сети, А.

Ток гармоник в начале \dot{I}_{p1} и в конце \dot{I}_{p2} рельсовой сети может быть получен в результате измерений с помощью автоматизированно-измерительного комплекса для определения параметров кодового тока и гармоник тягового тока, описанного в [1, 3]. Сопротивление рельсов и балласта определяется из [6-8]. Тогда ток утечки равен

$$\dot{I}_y = \dot{I}_{p1} - \dot{I}_{p2}. \quad (7)$$

Для неоднородной рельсовой сети, когда сопротивление рельсов или балласта изменяется по длине фидерной зоны, а источником гармоник является оборудование электровоза удобно пользоваться схемой замещения приведенной на рис. 3. Данная схема замещения позволяет определить распределение токов и напряжений вдоль рельсовой сети по длине фидерной зоны, когда источник гармонических составляющих находится на электровозе, оценить асимметрию токов в рельсовой цепи и ее влияние на работу устройств СЦБ. Рельсовая сеть здесь рассматривается как шестиполюсник, в котором \dot{E}_{z1} , \dot{E}_{z2} - ЭДС гармоника между рельсом P1 и землей, а также рельсом P2 и землей 3 соответственно; $\dot{U}_{p1н}$, $\dot{U}_{p2н}$, $\dot{U}_{p1к}$, $\dot{U}_{p2к}$ - потенциал рельсов P1 и P2 в начале и конце рельсового шестиполюсника соответственно; $\dot{I}_{p1н}$, $\dot{I}_{p2н}$, $\dot{I}_{p1к}$, $\dot{I}_{p2к}$ - ток гармоника в рельсах P1 и P2 в начале и конце рельсового шестиполюсника соответственно; \dot{I}_{y1} , \dot{I}_{y2} - токи утечки через балласт от рельса P1 и P2 соответственно; \dot{Z}_{p1} , \dot{Z}_{p2} - сопротивление рельсов P1 и P2 соответственно; $\dot{Z}_{б1}$, $\dot{Z}_{б2}$ - сопротивление балласта между рельсом P1 и землей, а также P2 и землей соответственно.

Также как и в предыдущем случае, сопротивлением источника гармонических составляющих ввиду его малости пренебрегаем (рис. 3).

Тогда потенциал рельса в начале шестиполюсника (возле электровоза) будет равен

$$\dot{U}_{p1н} = \dot{E}_{z1}, \quad \dot{U}_{p2н} = \dot{E}_{z2}. \quad (8)$$

Зная величину токов утечки и сопротивление балласта, можно определить потенциал рельсов в конце рельсового шестиполюсника

$$\dot{U}_{p1к} = \dot{I}_{y1} \cdot \dot{Z}_{б1}, \quad \dot{U}_{p2к} = \dot{I}_{y2} \cdot \dot{Z}_{б2}. \quad (9)$$

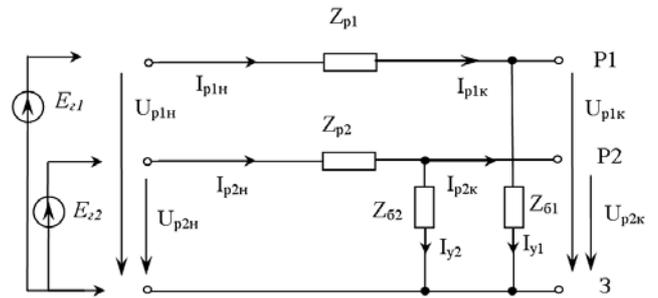


Рис. 3. Схема замещения неоднородной рельсовой сети

С другой стороны потенциал рельса в конце рельсового четырехполюсника можно найти как

$$\dot{U}_{p1н} = \dot{I}_{p1н} \cdot \dot{Z}_{p1} + \dot{U}_{p1к}, \quad (10)$$

$$\dot{U}_{p2н} = \dot{I}_{p2н} \cdot \dot{Z}_{p2} + \dot{U}_{p2к}. \quad (11)$$

Токи $\dot{I}_{p1н}$, $\dot{I}_{p2н}$, $\dot{I}_{p1к}$, $\dot{I}_{p2к}$ известны в результате измерений с помощью автоматизированного измерительного комплекса.

Результаты моделирования

Потенциалы рельсов в начале \dot{U}_{p1} и в конце \dot{U}_{p2} участка рельсовой сети могут быть найдены по формулам (3 - 5). Результаты моделирования потенциалов рельса в начале и конце рельсовой сети, обусловленные протеканием гармоники частотой 50 Гц, для токов утечки 1, 5 и 10 А даны на рис. 4, 5.

При выполнении моделирования сопротивление балласта принято равным $Z_b = 100$ Ом·км, рельсовой сети $Z_p = 0,11 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 8,021 \cdot 10^{-4}$ Ом/км, расстояние от электровоза до тяговой подстанции $l = 10$ км [8, 9].

Характер изменения потенциала рельсов в начале и в конце рельсового шестиполюсника показывает, что, чем больше расстояние между тяговой подстанцией и электровозом, тем меньше потенциал рельсов. Это характерно как для потенциала рельса возле электровоза (в начале рельсо-

вого четырехполюсника), так и в районе тяговой подстанции (в конце рельсового четырехполюсника). Зависимость $\dot{U}_{рн}(x)$, $\dot{U}_{рж}(x)$ нелинейная, а потенциал рельса возле электровоза будет несколько выше, чем возле тяговой подстанции. Погрешность между рассчитанными и измеренными данными не превышает $\pm 10\%$.

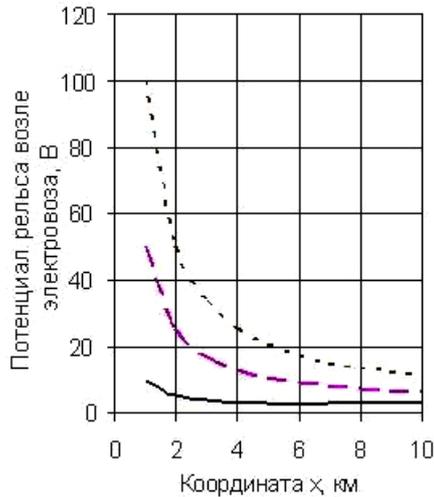


Рис. 4. Зависимость потенциала рельса гармоники 50 Гц возле электровоза от координаты (расстояния между электровозом и тяговой подстанцией)

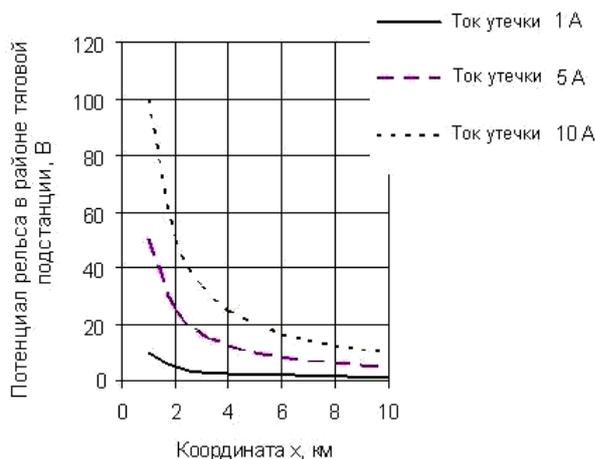


Рис. 5. Зависимость потенциала рельса гармоники 50 Гц возле электровоза и тяговой подстанции от координаты (расстояния между электровозом и тяговой подстанцией)

ВЫВОДЫ

Выполнен комплексный анализ электромагнитной совместимости устройств автоматики с системой тягового электропитания.

Разработана математическая модель системы тягового электропитания, которая позволяет учесть влияние помех, причиной возникновения которых является работа оборудования локомотивов постоянного тока в различных режимах, на устройства, подключенные к каналам АЛС.

В отличие от существующих в предложенной математической модели неоднородность участка определяется на основании данных, полученных во время проведения измерений вагоном-лабораторией с помощью специально разработанного оборудования.

Выполнено моделирование распределения гармоник тяговых токов частотой 50 и 100 Гц амплитудой 1, 5 и 10 А по длине питающего участка. Для моделирования были выбраны гармоники данной частоты, поскольку их появление в рельсовых линиях может оказать опасное или мешающее влияние на работу кодовых рельсовых цепей 50 Гц и систему АЛС, используемые на участках с электротягой постоянного тока.

Исследование распределения упомянутых выше гармоник по длине неоднородного железнодорожного участка с двусторонним питанием показало, что рельсовые цепи, установленные по краям фидерной зоны, а также те, возле которых находится локомотив, работают в наихудших условиях. Погрешность между рассчитанными и измеренными данными не превышает $\pm 10\%$.

Библиографический список

1. Сердюк, Т. Н. Экспериментальное исследование помех в рельсовых цепях [Текст] / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2005. - Вип. 9. - С. 15-18.

2. Лазарев, Ю. Ф. MatLAB 5.x. [Текст] / Ю. Ф. Лазарев – К.: Изд. группа BHV, 2000. – 384 с.
3. Сердюк, Т. Н. Взаимодействие системы тягового электроснабжения постоянного тока с рельсовыми цепями [Текст] / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007, № 4, С.108-112.
4. Serdyuk, T. Distribution of harmonics of return traction current on feeder zone and evaluation of its influence on the work of rail circuits [Text] / T. Serdyuk, V. Gavrilyuk // 18th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility EMC 2006. – Wroclaw (Poland). – 2006. – P. 467-470.
5. Адонц, Г. Т. Многополюсник (Теория и методы расчета). [Текст] / Г. Т. Адонц. – Е.: Изд-во АН Армянской ССР, 1965. – 468 с.
6. Каллер, М. Я. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. [Текст] / М. Я. Каллер, Ю. В. Соколов, А. Г. Богданов. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.
7. Сердюк, Т. Н. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с рельсовыми цепями [Текст] / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Залізничний транспорт України. – 2005. – спец. вип. 3/2. – С. 176–180.
8. Справочник по электроснабжению железных дорог. [Текст] Т. 1. / под ред. К. Г. Марквардта. – М.:Транспорт, 1980. – 256 с.
9. Котельников, А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств. [Текст] / А. В.Котельников, А. В. Наумов, Л. П. Слободянюк. – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.

Ключові слова: тяговий струм, рейкові кола, фідерна зона, завади, гармоніки.

Ключевые слова: тяговый ток, рельсовые цепи, фидерная зона, помехи, гармоники.

Key words: traction current, rail circuits, feeder zone, interferences, harmonics.

Поступила в редколлегию 23.03.2011.

Принята к печати 25.03.2011.