УДК 629.423.31:625.42

Гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения метрополитена

Максим ШЕВЛЮГИН
Maxim V. SHEVLYUGIN

ДАНГ Вьет Фук
Dang Viet Phuc

Шевлюгин Максим Валерьевич *– доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*
Данг Вьет Фук *– аспирант кафедры «Электроэнергетика транспорта» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия / Ханой, Вьетнам.*

Harmonic Interference of Traction Current in Metro Power Supply System
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 96)

Рассматриваются гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения Московского метрополитена. Представлена имитационная модель системы тягового электроснабжения для подвижного состава, созданная в среде MATLAB/Simulink. Приведены результаты моделирования и эксперимента по оценке гармонических помех тягового тока. Данные спектрального анализа сравнивались с нормами для оценки степени мешающего влияния помех на устройства СЦБ и АЛС-АРС. По результатам моделирования и экспериментальных замеров сделан вывод о возможности превышения тягового тока на частоте 50 Гц.

Ключевые слова: метрополитен, система тягового электроснабжения, гармонические помехи тягового тока, нормируемый уровень, имитационная модель, эксперимент, сравнительный анализ.

Основной причиной появления гармонических составляющих в тяговом токе системы электроснабжения метрополитена является работа тяговых подстанций (ТП) и электроподвижного состава (ЭПС). Помехи от гармонических составляющих, которые возникают в тяговой сети преимущественно за счет ЭПС, мешают устройствам обеспечения безопасности движения поездов – СЦБ и АЛС-АРС. В этих условиях особо актуальной становится задача, включающая в себя, с одной стороны, обеспечение электромагнитной совместимости устройств СЦБ и АЛС-АРС с системой тягового электроснабжения (СТЭ), а с другой – оценку гармонических помех тягового тока.

В статье рассматривается модель СТЭ Московского метрополитена с ЭПС, использующим тяговый привод с асинхронными двигателями. На рис. 1 система упрощенно представлена двумя источниками питания трехфазного переменного тока (ИП-1 и ИП-2), двумя тяговыми подстанциями (ТП-А и ТП-В) постоянного тока, подводящими линиями, тяговой сетью и ЭПС.

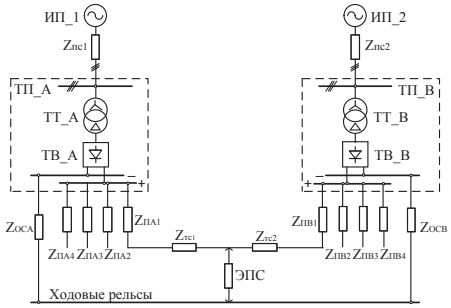


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения метрополитена.

Представленная схема содержит основные источники помех в СТЭ метрополитена, то есть ЭПС как перемещающийся источник помех и выпрямительные агрегаты ТП как стационарные источники помех. При применении на ТП шестипульсовых трехфазных мостовых выпрямителей в спектральном составе кривой выпрямленного напряжения присутствуют канонические гармоники (кратные 300 Гц) и неканонические гармоники (кратные 50 Гц). При наличии тягового привода с асинхронными двигателями в спектре тока ЭПС появляются низкочастотная и высокочастотная составляющие, а также гармоники комбинационных частот [4, 16–18]. Такие гармонические составляющие тягового тока могут в большей степени влиять на работу устройств СЦБ и АЛС-АРС. С учетом спектрального состава напряжения тяговой сети частотный спектр тока помехи можно определить по формуле [4]:

$$f_{кс} = \left| p \cdot m \cdot f_{шим} + 6 \cdot p \cdot l \cdot f_1 + j300 \right|, \qquad (1)$$

где: f_1 – частота тока статора асинхронного тягового двигателя, Гц;

p – число синхронизируемых преобразователей;

$f_{шим}$ – частота широтно-импульсной модуляции (ШИМ), Гц;

$m, l = -\infty ... -2, -1, 0, 1, 2, ... +\infty$.

Однако действующие амплитуды гармонических помех зависят от большого числа параметров, а именно: типа входного фильтра, инвертора напряжения и тяговых двигателей ЭПС, тяговой сети (продолжительность ее между ЭПС и ТП), типа выпрямительных агрегатов ТП, особенностей конструкций тоннеля и пр.

Для более точной оценки высокочастотного спектра тягового тока была разработана компьютерная модель СТЭ с ЭПС, составленная в среде MATLAB/Simulink [12–14]. В общем виде модель представлена на рис. 2. Модель СТЭ метрополитена соответствует принципиальной схеме (рис.1) и включает в себя два источника питания внешней сети (PS-1 и PS-2), две ТП (ТП) (Sub-A и Sub-B), подводящие питающие линии (RL-r1, RL-r2) и линии обратного тока (RL-f1, RL-f2), участки контактной сети (Net-1 и Net-2) и ЭПС, состоящий из 4 вагонов (Car1-Car4), а также систему мониторинга и измерения показателей работы ЭПС.

Модуль первичной питающей сети состоит из источника питания переменного тока номинальным напряжением $U_н = 10{,}5 \cdot 10^3$ В с эквивалентным активным сопротивлением и индуктивностью внешней сети.

На тяговых подстанциях А и В с шестипульсовыми трехфазными мостовыми выпрямителями осуществляется преобразование трехфазного переменного тока напряжением 10,5 кВ, получаемого от первичной энергосистемы города, в постоянный ток номинальным напряжением на шинах тяговой подстанции 825 В [2]. ТП Sub-A состоит из трех,, а Sub-B из четырех преобразовательных агрегатов с трансформаторами ТСЗП-1600/10 мощностью 1515 кВА. Для расчета параметров трансформатора использовались формулы, приведенные в [2, 3]. Модель выпрямителей оснащена блоком трехфазных мостовых выпрямителей «Universal Bride» [10, 11, 15] на элементах «diode» типа Д163-2500 с сопротивлением в открытом состоянии $R_{on} = 0{,}097 \cdot 10^{-3}$ Ом и пороговым напряжением $V_f = 0{,}85$ В.

Питание ЭПС осуществляется через питающие кабельные линии и контактную

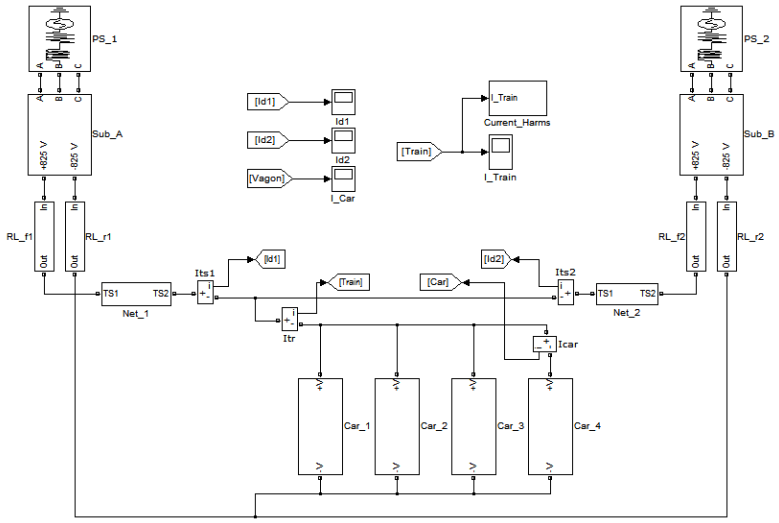


Рис. 2. Общая схема модели СТЭ с ЭПС в среде Matlab/Simulink.

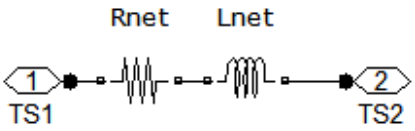


Рис. 3. Схема замещения участка тяговой сети метрополитена в MATLAB/Simulink.

сеть от двух ТП с принятым средним расстоянием между ними в 3 км.

Тяговая сеть системы электроснабжения метрополитена, которая состоит из контактной и рельсовой цепей, является линией с распределенными параметрами. В полосе исследуемых частот от гармонических составляющих тягового тока, не превышающих 10 кГц, тяговую сеть в расчетах можно заменять сосредоточенной RL-нагрузкой [1, 4, 5]. Модель тяговой сети включает в себя активное сопротивление R_{net} и индуктивность L_{net} (рис. 3).

При оценке параметров тяговой сети особое внимание уделялось расчету индуктивности. Для этого использовалась схема замещения короткозамкнутого участка тяговой сети метрополитена (рис. 4) [4, 5]. На схеме приняты следующие обозначения: U_{do} – напряжение холостого хода преобразователей ТП; К – место короткого замыкания; L_{Sub} и R_{Sub} – индуктивность и активное сопротивление постоянному току ТП питающей её системы; $L_к$, $R_к$ и L_{pe}, R_{pe} – индуктивность и активное сопротивление постоянному току 1 км контактного и ходовых рельсов I и II путей; $M_{кI\text{-}pI}$, $M_{кI\text{-}pII}$ и $M_{pI\text{-}pI}$ – взаимные индуктивности между контактным и ходовыми рельсами первого пути, контактным рельсом первого и ходовыми рельсами второго пути, ходовыми рельсами I и II пути на длине 1 км.

Индуктивность тяговой сети с длиной l_k включает в себя внутреннюю L'_{mc} и внешнюю L''_{mc} составляющие:

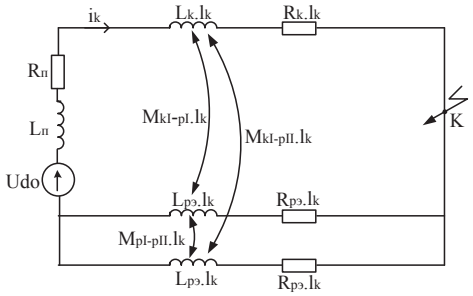


Рис. 4. Схема замещения короткозамкнутого участка тяговой сети метрополитена.

$$L_{mc} = (L'_{mc} + L''_{mc})l_k = [L'_k + \frac{L'_p}{2}\alpha +$$

$$+ L''_k + \frac{L''_p + M_{p-p}}{2}\alpha - M_{kI-pI}(1+\alpha)]l_k . \quad (2)$$

Внешние индуктивности контактного L''_k и ходового L''_p рельса, взаимоиндуктивности между рельсами M_{p-p} и между контактным и эквивалентным рельсами M_{kI-pI} были определены следующим образом [5]:

$$L'' = [2\ln(K \cdot \frac{10^4\sqrt{\tau}}{\sqrt{10\gamma_э} \cdot r_э})] \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км}; \quad (3)$$

$$M = [2\ln(K \cdot \frac{10^4\sqrt{\tau}}{\sqrt{10\gamma_э} \cdot a})] \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км}, \quad (4)$$

где γ_3 – проводимость земли по трассе, $\gamma_3 = 10^{-3}$ См/м;

$r_э$ – эквивалентный радиус токопровода, для типа рельса Р50 – $r_{э.50} = 0{,}098$ м, Р65 – $r_{э.75} = 0{,}111$ м и контактного рельса $r_{э.кр} = 0{,}0795$ м;

а – расстояние между токопроводами, м (для расстояния рельс – рельс $a_1 = 1{,}52$ м, контактный рельс – эквивалентный рельс $a_2 = 1{,}45$ м);

K – коэффициент, равный 0,318, для подземных участков с железобетонной отделкой тоннелей и 0,448 – для наземных участков.

Внутренние индуктивности контактного L'_k и ходового L'_p рельсов при экспоненциальном изменении тока с постоянной времени τ определяются следующим образом:

$$L' = \frac{0{,}48}{P}\sqrt{\mu_{ср}\rho\sqrt{\tau}}, \quad (5)$$

где P – периметр проводника, для ходового рельса типа Р50 – $P_{р.50} = 0{,}62$ м, Р65 – $P_{р.65} = 0{,}7$ м, контактного рельса – $P_к = 0{,}5$ м;

$\mu_{ср}$ – средние расчетные значения относительных магнитных проницаемостей контактного и ходового рельсов (определяются в зависимости от условного установившегося тока короткого замыкания I_∞);

ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом/м;

α – коэффициент распределения тока между рельсами путей, в переходном режиме определяется в соотношении с рекомендациями в [4, 5] от типа линии метрополитена.

В расчетах индуктивности тяговой сети внешняя индуктивность считается постоянной. С помощью приведенных выражений [4, 5] в зависимости от возможных параметров расчетного участка были рассчитаны максимальное или минимальное значения индуктивности тяговой сети метрополитена: $L_{тс.min} = 3{,}05 \cdot 10^{-3}$ Гн/км и $L_{тс.max} = 5{,}34 \cdot 10^{-3}$ Гн/км. В модели СТЭ принят неблагоприятный с точки зрения возникновения помех вариант $L_{тс} = L_{тс.min} = 3{,}05 \cdot 10^{-3}$ Гн/км.

Активное сопротивление тяговой сети складывается из сопротивления контактного рельса и сопротивления рельсовой цепи обратного тока, зависит от местоположения ЭПС на фидерной зоне и рассчитывается по следующим зависимостям [4,6]:

$$R_{mc} = R_{кр} \cdot l + R_{рс} \cdot l, \quad (6)$$

где $R_{кр}$ – электрическое сопротивление контактного рельса типа ТУ 14-2-82-73, $R_{кр} = 0{,}0189$ Ом/км [4];

$R_{рс}$ – сопротивление рельсовой цепи, Ом/км;

l – протяженность контактной и рельсовой цепей, км.

В рельсовых цепях предусматривают в среднем до 8–12 изолирующих стыков на 1 км пути. Сопротивление рельсовой цепи с учетом сопротивления включенных в сеть дроссельных стыков определяется по формуле [4, 6]:

$$R_{рс} = r_р \cdot (l + 0{,}036 \cdot m)/n, \quad (7)$$

где $r_р$ – сопротивление 1 км рельсовой нити, $r_р = 0{,}0254$ Ом/км для ходового рельса типа Р65;

0,036 – отношение сопротивления одного дроссельного стыка к сопротивлению 1 км целого рельса;

m – число изолирующих стыков (принимаем m = 10);

n – число параллельно включенных рельсовых нитей (для одного пути n = 2, для двух путей n = 4).

Подставив все составляющие в зависимости, получаем активное сопротивление тяговой сети $R_{тс} = 0{,}0362$ Ом/км.

Сопротивление питающей линии R_n и линии обратного тока R_o определялось в зависимости от длины кабелей $l_{каб}$, их

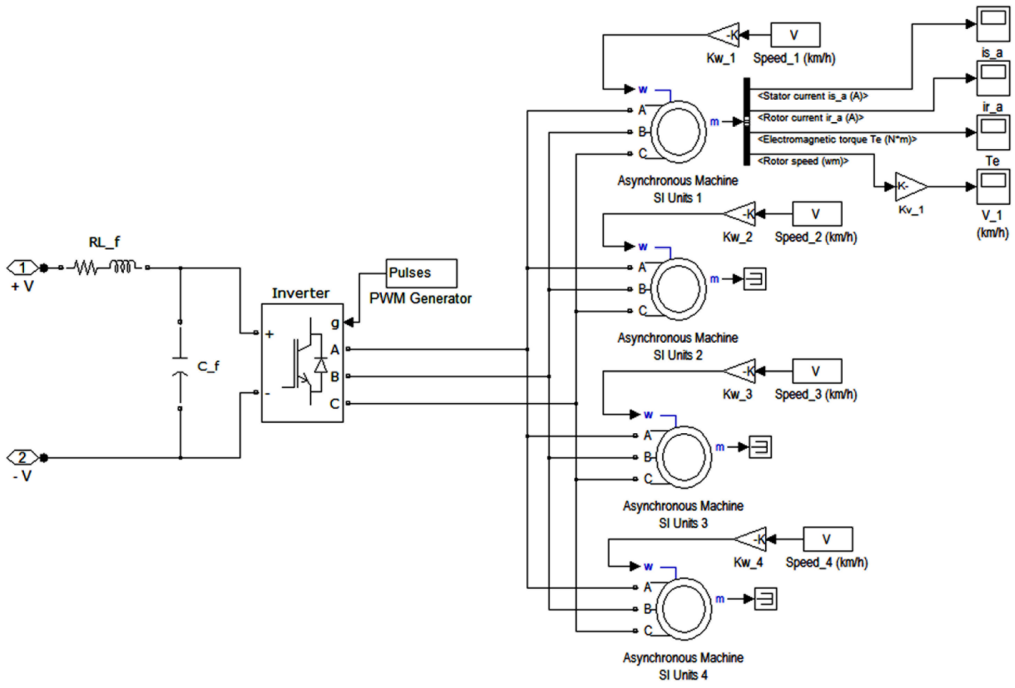


Рис. 5. Схема тягового привода вагона метрополитена с асинхронными двигателями в среде Matlab/ Simulink.

количества $m_{каб}$ и сопротивления жилы на 1 км r_o [4] по формуле:

$$R = \frac{r_{каб} \cdot l}{m_{каб}}. \quad (8)$$

Индуктивность кабелей находится в соответствии с их индуктивным сопротивлением $X_{каб}$ при прокладке в плоскости:

$$L = \frac{X_{каб}}{2\pi f}. \quad (9)$$

Модель ЭПС метрополитена состоит из четырех вагонов 81-740/741 (блоки «Car-1», «Car-2», «Car-3», «Car-4»), каждый из которых имеет тяговый привод с асинхронными двигателями (рис. 5). Модель главной схемы силовой цепи комплекта электрооборудования тягового привода каждого вагона включает в себя входной LC-фильтр (*RL-f* и *C-f*), автономный инвертор напряжения на IGBT-модулях с блоком PWM Generator для управления инвертором с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией, четыре параллельно включенные тяговые асинхронные двигатели типа ДАТЭ-170-4У2 номинальной мощностью по 170 кВт каждый. Автономный инвертор с помощью ШИМ преобразует напряжение постоянного тока, снимаемое с контактного рельса, в трехфазное напряжение с регулируемой амплитудой и частотой для питания четырех тяговых асинхронных двигателей. Частота коммутаций ШИМ инвертора в режиме тяги ЭПС составляет 2400 Гц.

Модель тягового двигателя построена на основе математических уравнений, приведенных в [1,3]. Входным механическим параметром модели двигателя является (блоки Constant «Speed-1», «Speed-2», «Speed-3», «Speed-4») заданное значение скорости ЭПС метрополитена в км/ч. Преобразование линейной скорости ЭПС V (км/ч) в угловую скорость (рад/с) осуществляется с помощью блоков Gain «K_{w_1}», «K_{w_2}», «K_{w_3}», «K_{w_4}» с коэффициентом $K_w = 1/0{,}2815$. Блок инвертора Universal Bride – трехфазный мост на IGBT транзисторах с дифференциальным сопротивлением IGBT – $r_т = 10^{-3}$ Ом.

Моделирование работы СТЭ метрополитена с ЭПС в среде Matlab/Simulink производилось методом «ode23tb» во временной области модельного времени на интервале 4–5 с, с шагом не менее 10^{-5} с, в режиме разгона до заданных уровней скоростей поезда – 10, 20, 30, 40,

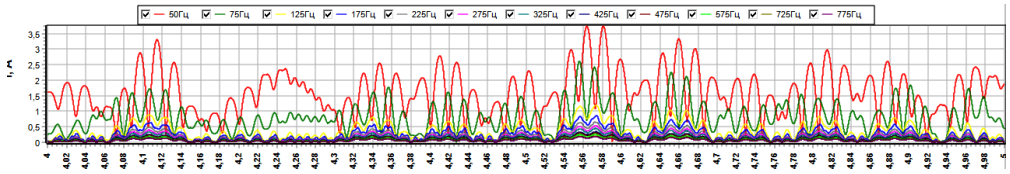


Рис. 6. Гармонические составляющие тока ЭПС в функции времени по результатам моделирования.

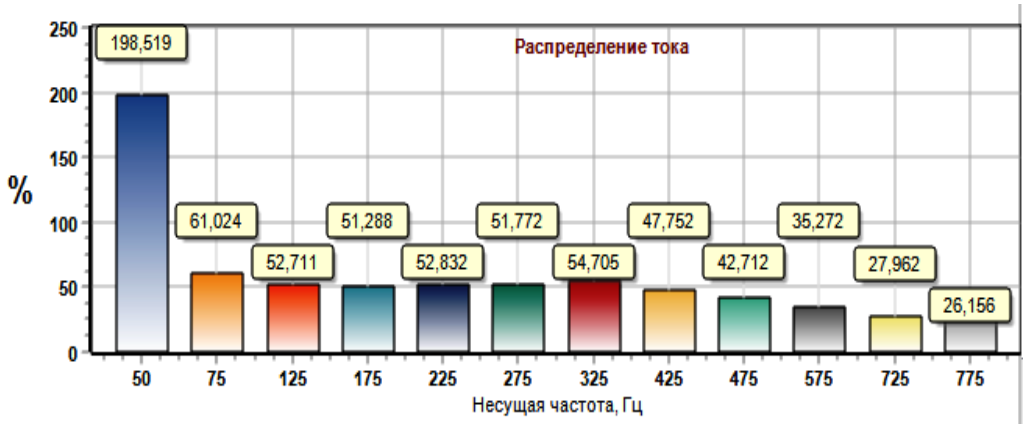


Рис. 7. Столбчатая диаграмма максимальных величин действующих значений гармоник тягового тока ЭПС на несущих частотах в процентном соотношении к нормируемым уровням по результатам моделирования.

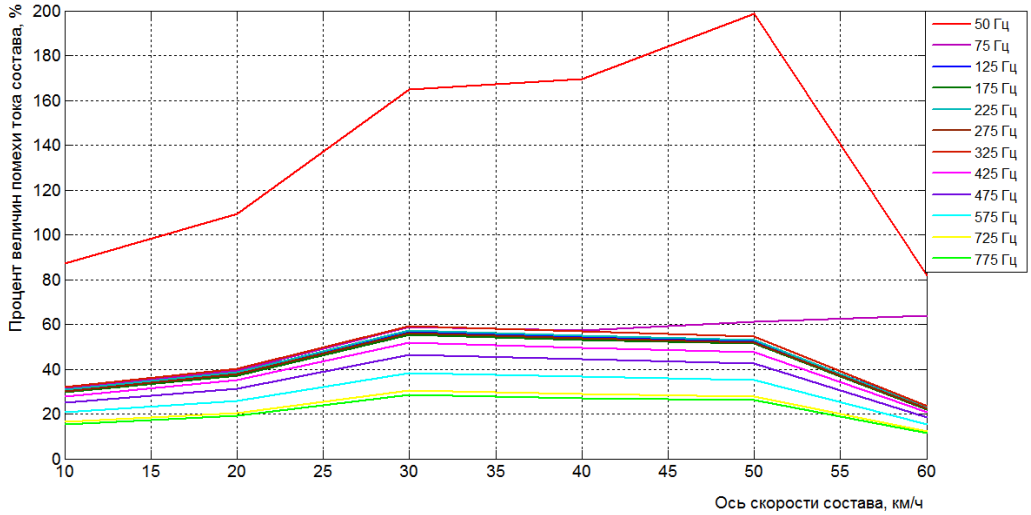


Рис. 8. Максимальные величины действующих значений гармоник тягового тока на несущих частотах в процентном соотношении к нормируемым уровням в зависимости от скорости ЭПС по результатам моделирования.

50, 60 км/ч. В данном случае принято допущение, что на рассматриваемом интервале процесс разгона заканчивается и оценка тягового тока происходит на стадии, когда ЭПС двигается с установившейся скоростью. В модели с помощью систем измерения и мониторинга фиксируются осциллограммы тока ЭПС и определяются его гармонические составляющие в полосе исследуемых частот методом Фурье. Пример мгновенных значений токов на частотах работы систем СЦБ и АЛС-АРС в функции времени представлен на рис. 6.

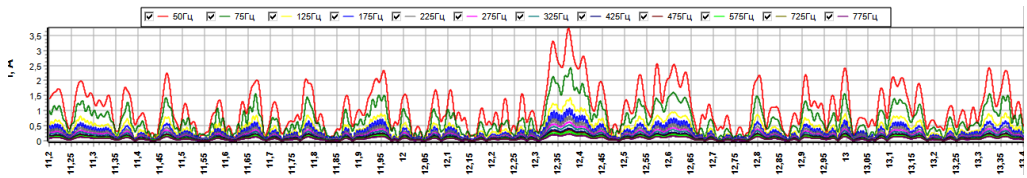


Рис. 9. Гармонические составляющие тока ЭПС в функции времени при экспериментальных замерах.

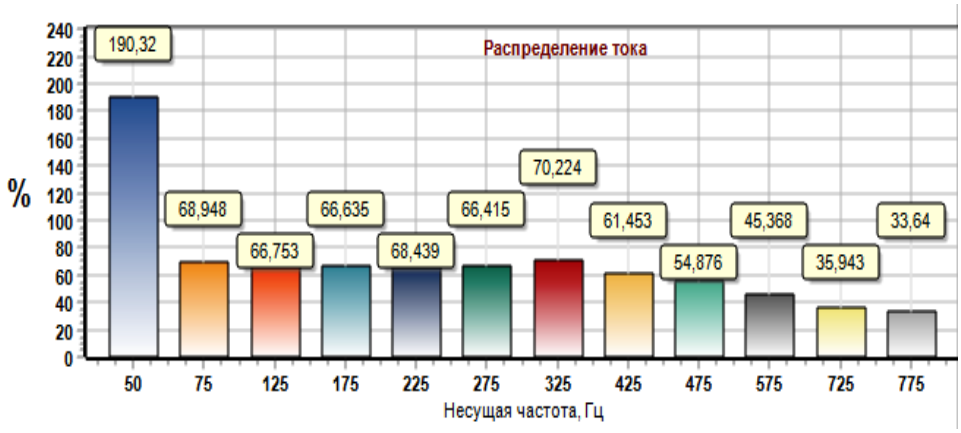


Рис. 10. Столбчатая диаграмма максимальных величин действующих значений гармоник тягового тока ЭПС на несущих частотах в процентном соотношении к нормируемым уровням при экспериментальных замерах.

Результаты моделирования обрабатывались при помощи программы, разработанной в среде Delphi, и в последующем сравнивались с нормируемыми допустимыми значениями в полосе исследуемых частот. В соответствии с типовой методикой ТМ318370-07071-21ЖД06-2002 оценки электромагнитной совместимости, принятой на Московском метрополитене, величины допустимых действующих значений гармонической составляющей тока состава на каждой из частот, используемых в устройствах СЦБ и АЛС-АРС, строго регламентируются. При анализе ток каждой гармоники из полосы исследуемых частот оценивается на максимальное значение действующей величины в скользящем окне времени 0,2 с. Полученные максимумы для каждой скорости движения ЭПС были отнесены к нормируемым значениям согласно методике и оценивались в процентном соотношении. Пример для скорости ЭПС 50 км/ч изображен на рис. 7, Итоговые кривые процентного соотношения токов во всей полосе частот на множестве скоростей движения ЭПС от 10 до 60 км/ч в положении 0,3 км от тяговой подстанции Sub-B представлены на рис. 8.

Следует отметить, что результаты моделирования сравнивались с данными экспериментальных замеров [7, 8]. Экспериментальная часть исследований по определению электромагнитного влияния работы электрооборудования ЭПС метрополитена на устройства СЦБ и АЛС-АРС проводилась совместно специалистами МИИТ и ВНИИЖТ в 2009 году на перегоне «Динамо»—«Белорусская» Замоскворецкой линии с использованием вагонов моделей 81-740.1/81-741.1 [7].

В экспериментальных испытаниях измерялись тяговые токи четырех вагонов ЭПС в режиме разгона при скорости от 47,86 до 52 км/ч на интервале 2,2 с. По данным, полученным в опытных поездках, произведен спектральный анализ составляющих общего тока ЭПС в полосе исследуемых частот с помощью преобразования Фурье в среде Matlab/Simulink. Определение величин действующего значения гармонических составляющих тока ЭПС в полосе частот, используемых в устройст-

вах СЦБ и АЛС-АРС, осуществлялось с использованием все той же программы в среде Delphi. Результаты экспериментальных исследований в аналогичной форме представлены на рис. 9 и рис. 10.

Анализ экспериментальных исследований и результатов моделирования показал: максимальное действующее значение гармонических возмущений в периоде 0,2 с как в эксперименте, так и при моделировании было определено на частоте 50 Гц; на частоте 50 Гц зафиксированы единичные превышения тока над нормируемым уровнем; на данной частоте при скорости 50 км/ч максимальное превышение составило 98%; при экспериментальных замерах при схожих условиях единичное превышение – 90%; величины действующего значения гармонических составляющих тока ЭПС в полосе частот, отличных от 50 Гц и используемых в устройствах СЦБ и АЛС-АРС, в диапазоне всех скоростей движения не превышают допустимых значений.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная модель СТЭ с ЭПС метрополитена достаточно полно учитывает факторы, влияющие на гармонический состав тягового тока.

2. Модель позволяет определить спектр гармонических составляющих во всей полосе частот, используемых системами СЦБ и АЛС-АРС.

3. Результаты моделирования коррелируются с результатами экспериментальных замеров.

4. В результате теоретических и экспериментальных исследований выявлена возможность превышения тягового тока на частоте 50 Гц над нормируемым уровнем помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киржнер Д. Л. Электромагнитная совместимость статических преобразователей частоты вагонов метрополитена с асинхронными тяговыми двигателями с системами сигнализации, централизации, блокировки и автоматического регулирования скорости / Дис... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 1986. – 298 с.

2. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / А. М. Колузаев, Л. С. Едигарян, Д. Г. Ермолов, Е. И. Быков, Л. Б. Кротов, Г. Е. Байнволь; под ред. Е. И. Быкова. – М.: Транспорт, 1977. – 431 с.

3. Герман-Галькин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – СПб.: Корона-принт, 2001. – 320 с.

4. Быков Е. И., Панин Б. В., Пупынин В. Н. Тяговые сети метрополитенов. – М.: Транспорт, 1987. – 256 с.

5. Пупынин В. Н. Защита и отклонение тяговых сетей в аварийных режимах / Дис... док. техн. наук. – М.: МИИТ, 1986. – 340 с.

6. Васильева М. А. Энергооптимальные режимы управления движением поезда метрополитена / Дис... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 2003. – 182 с.

7. Отчет о НИР «Внедрение систем, обеспечивающих полезное использование тормозной энергии ЭПС на Московском метрополитене». Руководитель НИР Баранов Л. А. – М.: МИИТ, 2009. – 397с.

8. Баранов Л. А., Бродский Ю. А., Гречишников В. А. и др. Оценка эффективности использования стационарных ёмкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения // Электротехника. – 2010. – № 1. – С. 62–65.

9. Гречишников В. А., Подаруев А. И., Шевлюгин М. В., Преобразовательный агрегат ёмкостного накопителя энергии для системы тягового электроснабжения метрополитена // Электротехника. – 2011. – № 5. – С. 17–22.

10. Waldemar Zajac. Harmonic distortion caused by suburban and underground rolling stock with D.C motors / Waldemar Zajac, Adam Szrlag // Power Electrionics Congress, 1996. Technical Proceeding. CIEP'96, V IEEE International. – 1996. – pp. 200–206.

11. R. Mathew. Locomotive «Total System» Simulation Using Simulink. [Текст] / R. Mathew, F. Flinders, W. Oghanna // Electrical Raiways in United Europe, 27–30 March 1995, Conference Publication № 404, IEEE.—1995.

12. CS. Chang. Modeling and simulation of DC Transit system with VSI-fed Induction Motor Driven Train Using PSB/MATLAB / CS. Chang., A. Khambadkone., Zhao Xu // IEEE PEDS2001 Indonesia. – 2001. – pp. 881–885.

13. F. Du. Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains / F. Du., J. H. He., L. Yu., M. X. Li., Z. Q. Bo., A. Klimek // IEEE2010 Asia-Pacific. – 2010. – pp. 1–4.

14. Hydro Québec. SimPowerSystems User's Guide. For Use with Simulink / Hydro Québec // Version 3. – 2003. – 3rd printing.

15. J. C. Brow. Six-pulse three-phase rectifier bride models for calculating close-up and remote short circuit transients on DC supplied railway / J. C. Brown, J. Allem, Prof. B. Mellitt // IEEE Proceeding-B. – 1991. – Vol. 138. – № 6.

16. Laurence Snider. Harmonic simulation of MTR Traction System by EMTP / Laurence Snider, Edward Lo, Terrance Lai // Proceeding of the IEEE PED'99. – 1999. – Vol. 1. – pp. 206–211.

17. Y. T. Hsiao. Measurement and characterization of harmonics on Taipei MRT DC System / Y. T. Hsiao, K. C. Lin // IEEE Transaction Industry Application. – 2004. – Volume 40. – № 6. – pp. 1700–1704.

18. A. Bialon. Disturbing influence of electric traction vehicles on signaling and control circuits on Silesian Regional Railway / A. Bialon, A. Szelag, W. Zajac // EMC and EME-95. – 26–30 June, 1995, St.Peterburg, Russia.

Координаты авторов: **Шевлюгин М. В.** – mx_sh@mail.ru, **Данг Вьет Фук** – dvietphuc1984@yahoo.com.

Статья поступила в редакцию 07.09.2015, принята к публикации 14.12.2015.

HARMONIC INTERFERENCE OF TRACTION CURRENT IN METRO POWER SUPPLY SYSTEM

Shevlyugin, Maxim V., *Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.*
Dang Viet Phuc, *Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia / Hanoi, Vietnam.*

ABSTRACT

Harmonic interference of traction current in the power supply system of Moscow Metro is considered. Simulation model of traction power supply system for rolling stock is presented, which was created under MATLAB / Simulink. The results of simulation and experiment on evaluation of harmonic interference of traction current are given. The spectral analysis data were compared with norms for assessment of interfering effect of interference on devices of signaling, centralization and blocking (hereinafter – SCB) and automatic train signaling with automatic speed regulation (hereinafter – ATS ASR). According to the results of modeling and experimental measurements conclusion was drawn that exceeding the traction current at a frequency of 50 Hz is possible.

Keywords: metro, traction power supply system, harmonic interference of traction current, normalized level, simulation model, experiment, comparative analysis.

Background. *The main cause of harmonic components in traction current of metro power supply system is the work of traction substations (hereinafter – TS) and electric rolling stock (hereinafter – ERS). Interferences from harmonic components that arise in traction network primarily by ERS, interfere with train safety devices – SCB and ATS ASR. In these circumstances, it becomes especially urgent task, which includes, on the one hand, provision of electromagnetic compatibility of SCB and ATS ASR devices with traction power supply system (hereinafter – TPS), and on the other – assessment of harmonic interference of traction current.*

The article considers TPS model of Moscow Metro with ERS, using traction drive with induction motors. Pic. 1 shows a simplified system of two power sources of three-phase alternating current (PS_1 and PS_2), two traction substations (Sub_A and Sub_B) of DC, supply lines, traction network and ERS.

Objective. *The objective of the authors is to study harmonic interference of traction current in metro power supply system.*

Methods. *The authors use general scientific and engineering methods, graph construction, mathematical analysis, evaluation approach.*

Results. *This scheme contains the main sources of interference in TPS of metro, i. e. ERS as moving source of interference and rectifiers of TS as stationary sources of interference. When applied to TS six-pulse three-phase bridge rectifier in the spectral composition of the curve of rectified voltage canonical harmonics are present (multiple of 300 Hz), and non-canonical harmonics (multiple of 50 Hz). In the presence of traction drive with asynchronous motors in the power range of ERS emerge low-frequency and high-frequency components and harmonics of combination frequencies [4, 16–18]. These harmonic components of traction current can largely affect the operation of SCB and ATS ASR devices. Given the spectral composition of voltage of traction network frequency current range of the interference can be determined by formula [4]:*

$$f_c = \left| p \cdot m \cdot f_{pwm} + 6 \cdot p \cdot l \cdot f_1 + j300 \right|, \qquad (1)$$

where: f_1 is frequency of current of the stator of the asynchronous traction motor, Hz;

p is a number of synchronized converters;

f_{pwm} is frequency of pulse-width modulation (PWM), Hz;

m, l = –∞…–2,–1, 0, 1, 2, …+∞.

However, rms amplitude of harmonic interference depends on many parameters, such as: type of input filter, voltage inverter and traction motors of ERS, traction network (its length between ERS and TS), type of rectifiers of TS, design features of the tunnel and so on.

For more accurate assessment of high-frequency range of traction current has been developed a computer model of TPS with ERS, made in MATLAB / Simulink [12–14]. In general, the model is shown in Pic. 2. TPS model of metro corresponds to schematic diagram (Pic. 1) and includes two power sources of external network (PS-1 and PS-2), two TS (Sub–A and Sub–B), inlet feed lines (RL–r1, RL–r2) and return current lines (RL–f1, RL–f2), sections of catenary (Net-1 and Net-2) and ERS consisting of four carriages (Car1-Car4), and monitoring and measuring performance system of ERS.

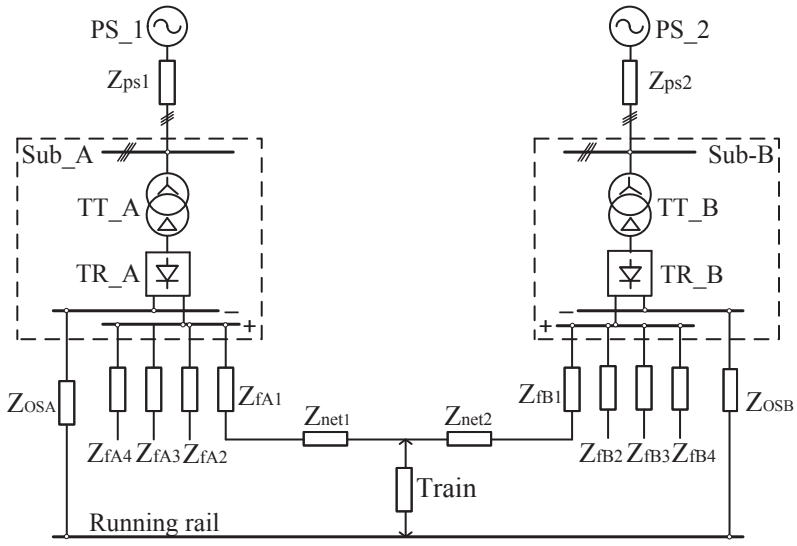
The module of primary supply network consists of AC power source with nominal voltage $U_n = 10{,}5 \cdot 10^3$ V with equivalent active resistance and inductance of the external network.

At traction substations A and B with six-pulse three-phase bridge rectifiers conversion of three-phase AC with voltage of 10,5 kV is carried out, resulting from the primary power supply system of the city, in DC with nominal voltage on tires of traction substation 825 V[2]. TS Sub–A consists of 3, and Sub–B of 4 conversion units with transformers type TSZP –1600/10 power of 515 kVA. To calculate the parameters of the transformer the formulas were used given in [2,3]. The model of rectifiers is equipped with a block of three-phase bridge rectifiers «Universal Bride» [10, 11, 15] on the elements of «diode» type D163–2500 with resistance of diode in the open state $R_{on} = 0{,}097 \cdot 10^{-3}$ Ohm and threshold voltage $V_t = 0{,}85$ V.

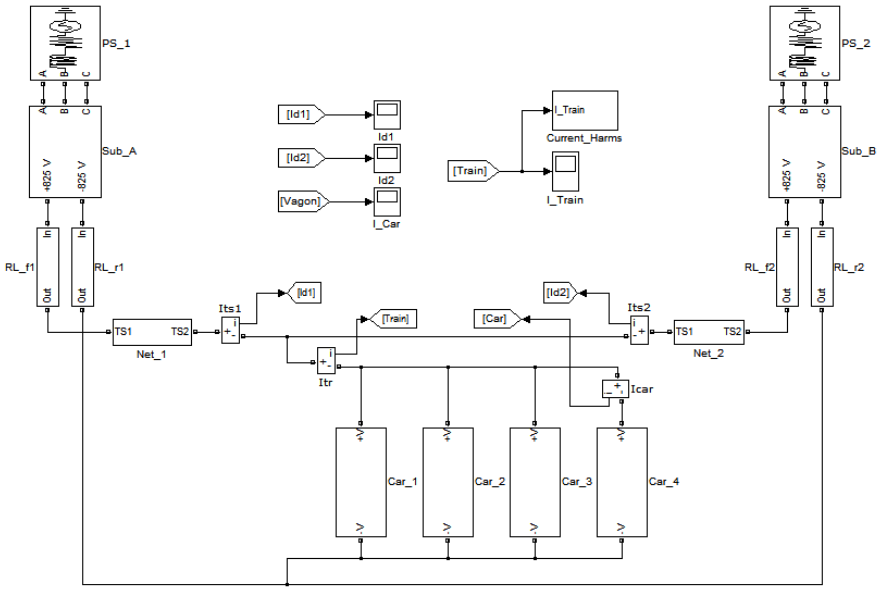
Power supply of ERS is performed through feed cable lines and caternary from two TS and taken average distance between them is 3 km.

Traction network of metro power supply system, which consists of contact and track circuits, is a line with distributed parameters. In the band of considered frequencies from traction current harmonic components, not exceeding 10 kHz, traction network in the calculations can be replaced with lumped RL-load [1, 4, 5]. Model of traction network includes active resistance R_{net} and inductance L_{net} (Pic. 3).

In assessing traction network parameters special attention was paid to calculation of inductance. We used scheme of replacement of short – circuited section of metro traction network (Pic. 4) [4, 5]. In the diagram, the following notations are used: U_{do} is open circuit voltage of converters of TS; K is place of short circuit; L_{Sub} and R_{Sub} are inductance and active



Pic. 1. Schematic diagram of metro power supply.



Pic. 2. The general scheme of the model TPS with ERS in Matlab / Simulink.

resistance to DC of TS of its supply system; L_c, R_c and L_{re}, R_{re} are inductance and resistance to DC of 1 km of contact and running rails of I and II tracks; $M_{cI\text{-}rI}$, $M_{cI\text{-}rII}$ *and* $M_{pI\text{-}pI}$ *are mutual inductances between contact and running rails of the first track, contact rail of the first and running rail of the second track, running rails of I and II track on the length of 1 km.*

Inductance of traction network with the length l_k *includes internal* $L_{in}^{'}$ *and external* $L_{in}^{''}$ *components:*

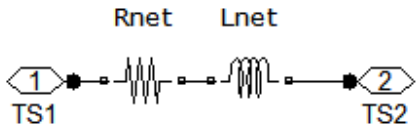
$$L_{in} = (L_{in}^{'} + L_{in}^{''})l_k = [L_k^{'} + \frac{L_p^{'}}{2}\alpha + L_k^{''} + \\ + \frac{L_p^{''} + M_{p-p}}{2}\alpha - M_{kI-pI}(1+\alpha)]l_k. \quad (2)$$

External inductances of contact $L_c^{''}$ *and running* $L_r^{''}$ *rails, mutual inductance between rails* M_{r-r} *and between contact and equivalent rails* M_{cI-rI} *were determined as follows: [5]*

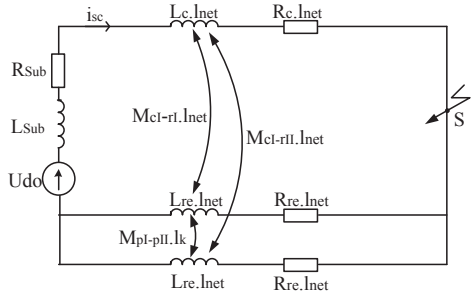
$$L^{''} = [2\ln(K \cdot \frac{10^4\sqrt{\tau}}{\sqrt{10\gamma_g} \cdot r_e})] \cdot 10^{-4}, \ H/km; \quad (3)$$

$$M = [2\ln(K \cdot \frac{10^4\sqrt{\tau}}{\sqrt{10\gamma_g} \cdot a})] \cdot 10^{-4}, \ H/km, \quad (4)$$

where γ_g *is conductivity of the ground around the track,* $\gamma_g = 10^{-3}$ *S/m;*



Pic. 3. Scheme of replacement of section of metro traction network in MATLAB/Simulink.



Pic.4. Scheme of replacement of short-circuited section of metro traction network.

r_e is equivalent radius of current wire for the type of rail R50 – $r_{e.50}$ = 0,098 m, R65 – $r_{e.75}$ = 0,111 m and contact rail $r_{e.cr}$ = 0,0795 m;

a is distance between current wires, m (for distance rail – rail a_1 = 1,52 m, contact rail – equivalent rail a_2 = 1,45 m);

K is coefficient equal to 0,318, for underground areas with concrete finishing of tunnels and 0,448 – for land sections.

Internal inductances of contact $L_c^{'}$ and running $L_r^{'}$ rails with an exponential change in the current with a time constant τ are defined as follows:

$$L^{'} = \frac{0,48}{P}\sqrt{\mu_{av}\rho}\sqrt{\tau}, \qquad (5)$$

where P is perimeter of the wire, for running rail type R50 – $P_{r.50}$ = 0,62 m, R65 – $P_{r.65}$ = 0,7 m, contact rail – P_c = 0,5 m;

μ_{av} are average calculated values of relative permeabilities of contact and running rails (determined depending on nominal short-circuit current I_{∞});

ρ is resistivity of the conductor material, Ohm/m;

α is current distribution ratio between rails of tracks, in transition mode is determined in relation to the recommendations in [4, 5] of the type of metro lines.

In inductance calculations of traction network external inductance is assumed to be constant. With the help of these expressions [4, 5], depending on possible parameters of a design section were calculated maximum or minimum values of inductance of metro traction network: $L_{tn.min} = 3,05 \cdot 10^{-3}$ H/km and $L_{tn.max} = 5,34 \cdot 10^{-3}$ H/km. In TPS model is taken unfavorable from the point of view of emergence interference option $L_{tn} = L_{tn.min} = 3,05 \cdot 10^{-3}$ H/km.

Active resistance of traction network is made up of resistance of contact rail and resistance of rail track of return current depends on location of ERS to the feeder zone and is calculated according to the following relationships [4,6]:

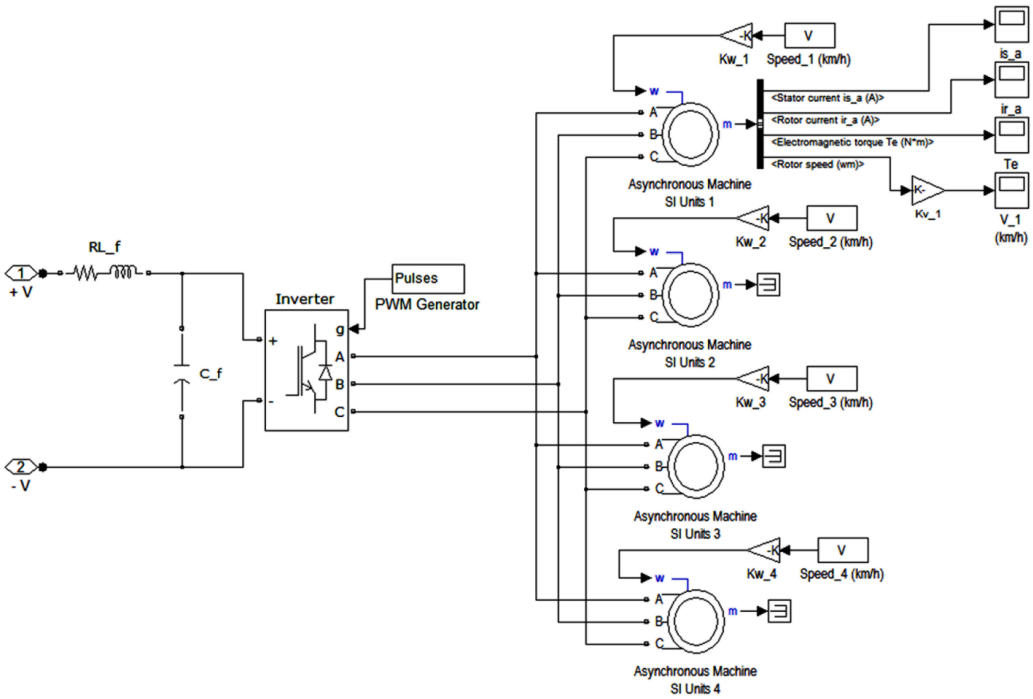
$$R_{tn} = R_{cr} \cdot l + R_{rc} \cdot l, \qquad (6)$$

where R_{cr} is electrical resistance of contact rail, type according to TU14–2–82–73, R_{cr} = 0,0189 Ohm/km [4];

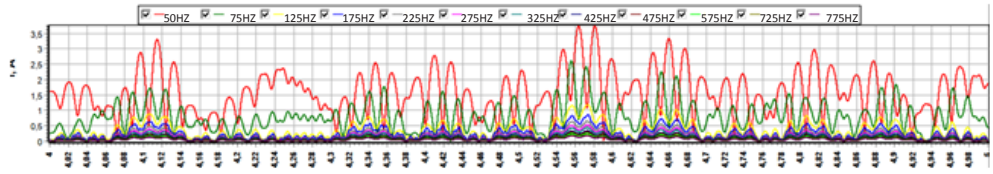
R_{rc} is resistance of rail circuit, Ohm / km;

l is length of contact and rail circuits, km.

In rail circuits are provided on average up to 8–12 insulating joints per 1 km. Resistance of rail circuit,



Pic. 5. Scheme of traction drive of metro car with asynchronous motors in Matlab / Simulink.



Pic. 6. The harmonic components of the current ERS as a function of time according to simulation results.

taking into account resistance of included in the network throttle joints is defined by the formula [4, 6]:

$$R_{rc} = r_r \cdot (l + 0{,}036 \cdot m) / n, \qquad (7)$$

where r_r is resistance of 1 km of rails, r_r = = 0,0254 Ohm/km for running rail type P65;

0,036 is ratio of resistance of one throttle junction to resistance of 1 km of a whole rail;

m is a number of insulating joints (we take m = 10);

n is a number of parallel included rails (for one track n = 2, for two tracks n = 4).

Substituting all components in dependencies, we get active resistance of traction network R_{tn} = 0,0362 Ohm/km.

Resistance of supply line R_{sl} and return current line R_{rec} was determined depending on the length of cables l_{cab}, their number m_{cab} and resistance of conductor per 1 km r_o [4] according to the formula:

$$R = \frac{r_o \cdot l_{cab}}{m_{cab}}. \qquad (8)$$

The inductance of cables is found in accordance with their inductive resistance X_{cab} when laying in the plane:

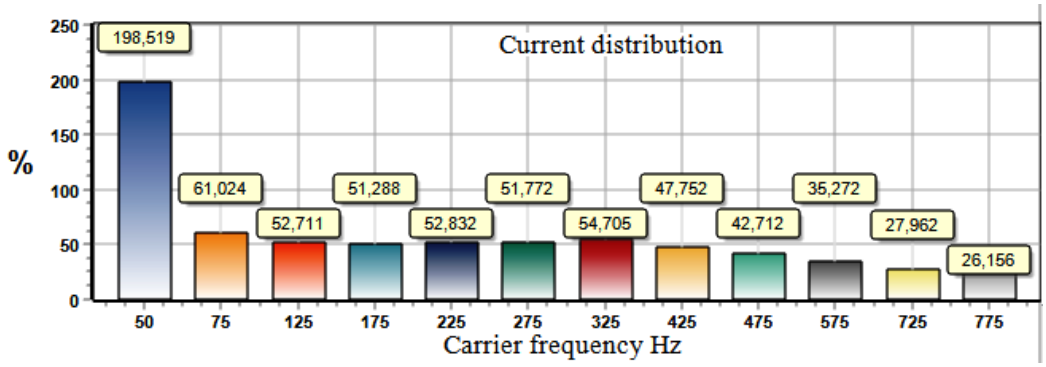
$$L = \frac{X_{cab}}{2\pi f}. \qquad (9)$$

ERS model of metro consists of 4 carriages models 81–740 / 741 (blocks «Car-1», «Car-2», «Car-3», «Car-4»), each of which has a traction drive with asynchronous motors (Pic. 5). Model of the main scheme of power circuit of electric equipment of traction drive of each carriage includes an input LC-filter (RL–f and C–f), autonomous voltage inverter on IGBT-modules with the unit PWM generator to control the inverter with sinusoidal pulse width modulation, four parallel-connected traction asynchronous motors type DATE-170–4U2 with a rated capacity of 170 kW each. Autonomous inverter with PWM converts DC voltage are taken from the contact rail, in three-phase voltage with variable amplitude and frequency to supply 4 asynchronous traction motors. Switching frequency of PWM inverter in traction mode of ERS is 2400 Hz.

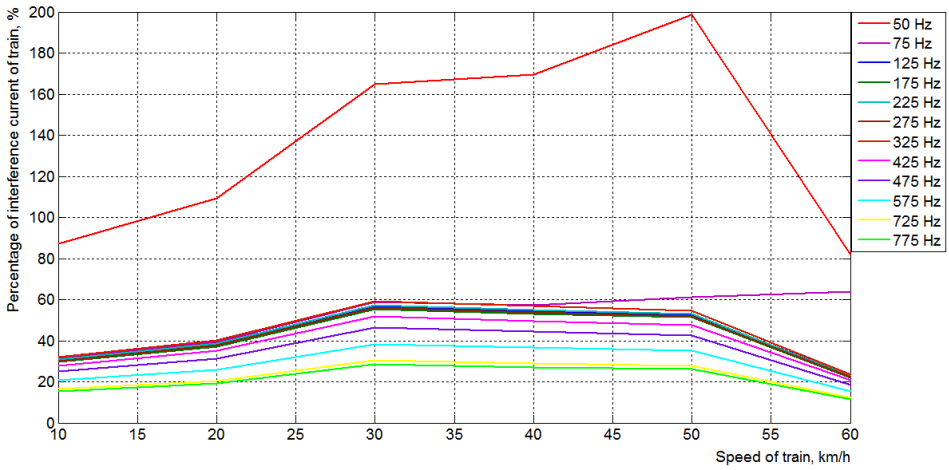
Traction motor model is based on mathematical equations given in [1,3]. The input mechanical parameter of the motor model is (units Constant «Speed-1», «Speed-2», «Speed-3», «Speed-4»), the set speed value of ERS of metro in km/h. Conversion of linear speed of ERS V (km / h) in the angular speed (rad / s) is performed by blocks Gain « K_{w_1}», « K_{w_2}», « K_{w_3}», « K_{w_4}» with coefficient K_w = 1 / 0,2815. Inverter unit Universal Bride is a three-phase bridge on IGBT transistors with differential resistance IGBT – r_t = 10^{-3} ohm.

Simulation of work of TPS of metro with ERS in Matlab / Simulink was performed by the method «ode23tb» in the time domain of modeling time ranging from 4–5 s, with a pitch of not less than 10^{-5} s, overclocking to predetermined level of train speeds – 10, 20, 30, 40, 50, 60 km / h. In this case, the assumption is made that in the interval the acceleration process ends and evaluation of traction current occurs at the stage when ERS moves at stabilized speed. In the model using measuring and monitoring systems are recorded oscillograms of current of ERS and its harmonic components are defined in the band of frequencies investigated using Fourier method. An example of instantaneous values of currents at the frequencies of operation of SCB and ATS ASR systems in function of time is shown in Pic. 6.

The simulation results were processed using a program developed with Delphi, and subsequently compared with the normalized permissible values in the frequency band studied. In accordance with the standard method TM318370–07071–21ZHD06–2002



Pic. 7. Column diagram of maximum values of rms values of harmonics of traction current of ERS at carrier frequencies as a percentage to normalized levels according to simulation results.

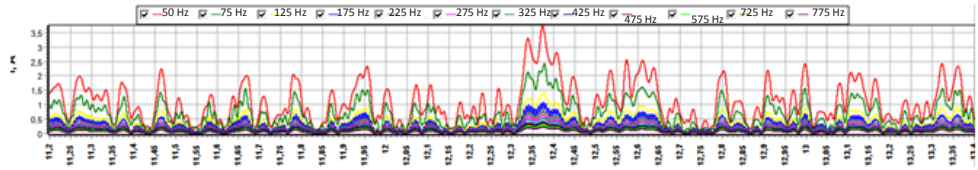


Pic. 8. Maximum values of rms values of harmonics of traction current at carrier frequencies as a percentage of normalized levels, depending on the speed of ERS as a result of simulation.

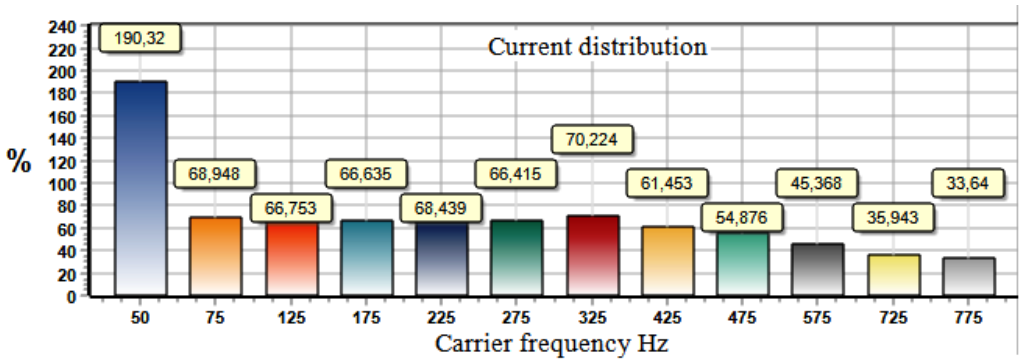
of electromagnetic compatibility assessment adopted at Moscow metro, permissible rms values of the harmonic component of the current of the train at each of frequencies used in SCB and ALS-ARS devices, are strictly regulated. When analyzing the current of each harmonic of the considered frequency band is measured as for maximum rms value in the sliding window of time of 0,2 seconds. These peaks for each speed of ERS were related to normalized values according to the procedure and evaluated as a percentage. Example for rate ERS of 50 km/h is shown in Pic. 7. The final curves of percentage of currents in the whole frequency band on the set of speeds of ERS from 10 to 60 km/h at the position of 0,3 km from the traction substation Sub–B are shown in Pic. 8.

It should be noted that the simulation results were compared with experimental measurements [7, 8]. The experimental part of the study to determine the electromagnetic influence of electrical equipment of ERS on metro SCB and ATS ASR devices was conducted jointly by MIIT and VNIIZhT in 2009 on the haul of «Dynamo»–«Belorusskaya» of Zamoskvoretskaya line using cars models 81–740.1/81–741.1 [7].

In experimental tests were measured traction currents of 4 cars of ERS during acceleration at a speed from 47,86 to 52 km/h in 2,2 seconds interval. According to data obtained in experimental trips has been performed spectral analysis of components of total current of ERS in the band of frequencies



Pic. 9. Harmonic components of ERS current as a function of time in experimental measurements.



Pic. 10. Histogram of maximum values of rms values of harmonics of traction current of ERS at carrier frequencies as a percentage of normalized levels in experimental measurements.

investigated using Fourier transform in the environment of Matlab/Simulink. Determination of effective value of harmonic components of ERS current in the frequency band used in devices SCB and ATS ASR, carried out with the use of the same program in Delphi. The experimental results are presented in a similar form in Pic. 9 and Pic. 10.

Analysis of experimental and modeling results showed that the maximum rms value of harmonic disturbances in the period of 0,2 seconds as in the experiment and as in the simulation has been determined at a frequency of 50 Hz; at 50 Hz single overcurrent above normalized levels was recorded; at a given frequency at a speed of 50 km/h maximum overcurrent was 98%; in experimental measurements under similar conditions single overcurrent was 90%; values of rms values of harmonic components of current of ERS in the band other than 50 Hz, and used in SCB and ATS ASR devices, in the range of speeds, which do not exceed permissible values.

Conclusions.

1. The developed model of TPS with ERS of metro almost completely takes into account the factors influencing the harmonic composition of traction current.

2. The model allows to determine the range of harmonic components in the entire frequency band used by systems SCB and ATS ASR.

3. The simulation results correlate to the experimental measurements.

4. As a result of theoretical and experimental studies was revealed the possibility of exceeding the traction current at 50 Hz over normalized level of interference.

REFERENCES

1. Kirzhner, D. L. Electromagnetic compatibility of static frequency converters of metro cars with asynchronous traction motors with signaling, centralization and blocking and automatic speed regulation [*Elektromagnitnaja sovmestimost' staticheskih preobrazovatelej chastoty vagonov metropolitena s asinhronnymi tjagovymi dvigateljami s sistemami signalizacii, centralizacii, blokirovki i avtomaticheskogo regulirovanija skorosti*]. Ph.D. (Eng.) thesis. Moscow, MIIT publ., 1986, 298 p.

2. Koluzaev, A. M., Edigaryan, L. S., Ermolov, D. G., Bykov, E. I., Krotov, L. B., Baynvol G. E.. Electric power supply of metro. Installation, operation and design [*Elektrosnabzhenie metropolitenov. Ustrojstvo, ekspluatacija i proektirovanie*]. Ed. by E. I. Bykov. Moscow, Transport publ., 1977, 431 p.

3. German-Galkin, S. G. Computer simulation of semiconductor systems in MATLAB6.0 [*Komp'juternoe modelirovanie poluprovodnikovyh sistem v MATLAB6.0*]. St. Petersburg, Korona-print, 2001, 320 p.

4. Bykov, E. I., Panin, B. V., Pupynin V. N. Traction network of metro [*Tjagovye seti metropolitenov*]. Moscow, Transport publ., 1987, 256 p.

5. Pupynin, V. N. Protection and deviation of traction networks in emergency conditions [*Zashhita i otklonenie tjagovyh setej v avarijnyh rezhimah*]. D.Sc. (Eng.) thesis. Moscow, MIIT publ., 1986, 340 p.

6. Vasilieva, M. A. Power optimal modes of metro train control [*Energooptimal'nye rezhimy upravlenija dvizheniem poezda metropolitena*]. Ph.D. (Eng.) thesis. Moscow, MIIT publ., 2003, 182 p.

7. Report on the research project «Implementation of systems to ensure beneficial use of braking energy of ERS at Moscow metro» [*Otchet o NIR «Vnedrenie sistem, obespechivajushhih poleznoe ispol'zovanie tormoznoj jenergii EPS na Moskovskom metropolitene*»]. Leader of research project Baranov L. A. Moscow, MIIT publ., 2009, 397 p.

8. Baranov, L. A., Brodsky, Yu. A., Grechishnikov, V. A. *et al.* Evaluation of the use of fixed capacitive energy storage in the metro based on experimental measurements of performance of traction power supply system [*Ocenka effektivnosti ispol'zovanija stacionarnyh jomkostnyh nakopitelej energii v metropolitene na osnove eksperimental'nyh zamerov pokazatelej raboty sistemy tjagovogo elektrosnabzhenija*]. *Elektrotehnika*, 2010, Iss. 1, pp. 62–65.

9. Grechishnikov, V. A. Podaruev, A. I., Shevlyugin, M. V. Converter of unit capacitive energy storage for traction power supply system of metro [*Preobrazovatel'nyj agregat jomkostnogo nakopitelja energii dlja sistemy tjagovogo elektrosnabzhenija metropolitena*]. *Elektrotehnika*, 2011, Iss. 5, pp. 17–22.

10. Zajac, Waldemar. Harmonic distortion caused by suburban and underground rolling stock with D.C motors / Waldemar Zajac, Adam Szrlag. *Power Electrionics Congress, 1996. Technical Proceeding. CIEP'96, V IEEE International*, 1996, pp. 200–206.

11. Mathew, R. Locomotive «Total System» Simulation Using Simulink / Mathew, R., Flinders, F., Oghanna, W. *Electrical Raiways in United Europe, 27–30 March 1995, Conference Publication № 404, IEEE*,1995.

12. Chang, CS. Modeling and simulation of DC Transit system with VSI-fed Induction Motor Driven Train Using PSB/MATLAB / CS. Chang., A. Khambadkone., Zhao Xu. *IEEE PEDS2001 Indonesia*, 2001, pp.881–885.

13. Du, F. Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains / F. Du., J. H. He., L. Yu., M. X. Li., Z. Q. Bo., A. Klimek. *IEEE2010 Asia-Pacific*, 2010, pp. 1–4.

14. Hydro Qu bec. SimPowerSystems User's Guide. For Use with Simulink / Hydro Qu bec // Version 3, 2003, 3rd printing.

15. Brow, J. C. Six-pulse three-phase rectifier bride models for calculating close-up and remote short circuit transients on DC supplied railway / J. C. Brown, J. Allem, Prof. B. Mellitt. *IEEE Proceeding-B*, 1991, Vol.138, Iss. 6.

16. Snider, Laurence *et al.* Harmonic simulation of MTR Traction System by EMTP / Laurence Snider, Edward Lo, Terrance Lai. *Proceeding of the IEEE PED'99*, 1999, Vol. 1, pp. 206–211.

17. Hsiao, Y. T. Measurement and characterization of harmonics on Taipei MRT DC System / Y. T. Hsiao, K. C. Lin. *IEEE Transaction Industry Application*, Vol. 40, 2004, Iss. 6, pp. 1700–1704.

18. Bialon, A. Disturbing influence of electric traction vehicles on signaling and control circuits on Silesian Regional Railway / A. Bialon, A. Szelag, W. Zajac. *EMC and EME-95*, 26–30 June, 1995, St.Peterburg, Russia.

Information about the authors:

Shevlyugin, Maxim V. – D.Sc. (Eng.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, mx_sh@mail.ru.

Dang Viet Phuc – Ph.D. student of the department of Electric power of transport of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia / Hanoi, Vietnam, dvietphuc1984@yahoo.com.

Article received 07.09.2015, accepted 14.12.2015.