

УДК 656.259.12

**ОЦЕНКА АСИММЕТРИИ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЧАСТОТ  
ТОНАЛЬНОГО СПЕКТРА**

Ассист. А.Ю. Журавлев

**ОЦІНКА АСИМЕТРІЇ РЕЙКОВОЇ ЛІНІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ЧАСТОТ  
ТОНАЛЬНОГО СПЕКТРА**

Асист. А.Ю. Журавльов

**EVALUATION OF ASYMMETRY OF RAILWAY LINE, OF INFORMATION  
FREQUENCY OF TONAL SPECTRUM**

Assistant A.Y. Zhuravlev

*В статье рассмотрена методика оценки асимметрии рельсовой линии, дополненной расчетами гармоник низкочастотного и тонального спектра с учетом сопротивлений рельсов и стальных рельсовых соединителей. Используемые уравнения учитывают взаимодействия трех цепей с распределенными параметрами, связанных взаимной индуктивностью: первый, второй рельс – земля и контактный провод – земля, каждая цепь имеет собственную проводимость и удельное сопротивление току с частотой рассчитываемой гармоники, цепи связаны взаимной индуктивностью и проводимостью по*

поверхности шпал. Оценка уровней гармоник важна для разработки защитных средств от помех в тяговой сети.

**Ключевые слова:** асимметрия, рельсовая цепь, рельсовая линия, гармоника, тяговый ток, электромагнитное влияние, взаимная индуктивность, контактный провод.

У статті розглянуто методу оцінки асиметрії рейкової лінії, доповненої розрахунками гармонік низькочастотного і тонального спектра з урахуванням опорів рейок і сталевих рейкових з'єднувачів. Використовувані рівняння враховують взаємодії трьох кіл з розподіленими параметрами, пов'язаних взаємною індуктивністю: перша, друга рейка – земля і контактний провід – земля, кожне коло має власну провідність і питомий опір струму з частотою гармоніки, яка розраховується, кола пов'язані взаємною індуктивністю і провідністю по поверхні шпал. Оцінка рівнів гармонік важлива для розроблення захисних засобів від перешкод у тяговій мережі.

**Ключові слова:** асиметрія, рейкове коло, рейкова лінія, гармоніка, тяговий струм, електромагнітний вплив, взаємна індуктивність, контактний провід.

*In this connection the estimation of levels of harmonics is conducted in the article, in a range from low to the tonal frequencies applied in the rail chains of the systems of railway automatic and teleautomatics. Reviewed methodology of decision of the problem - evaluation of track circuit, asymmetry, supplemented with estimates of harmonic of low-frequency and tonal spectrum, taking into account the resistances of rails and steel rail connectors. Equations for rating of harmonics of current traction taking into account is the interaction of three circuits with distributed parameters associated mutual induction: the first track - ground, the second track - ground and contact wire - ground. Each chain "track - ground" has its own conductivity and resistivity current to the frequency calculated harmonics, both chains are connected by mutual inductance and conductivity on surface sleepers. Chain "contact wire - ground" has resistivity and connected with the tracks mutual inductance. Assessment of levels of harmonics is important for the development of protective equipment from interference made traction current, and ensure stable operations of the track circuits and systems of railway automation and telemechanics in general.*

**Key words:** asymmetry, track circuits, railway line, harmonic, traction current, electromagnetic interference, mutual inductance, contact wire.

**Введение.** Применение в последние годы тяговых двигателей электровозов и электропоездов по системе трехфазного тока привело к обогащению спектра тягового тока в рельсовой линии (РЛ). В связи с этим представляется актуальным проведение оценки уровней гармоник в диапазоне от низких (25 Гц) до тональных частот (420-780 Гц), применяемых в рельсовых цепях (РЦ) систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). Это важно также и для разработки защитных средств аппаратуры от помех, мешающих влиянию тягового тока, и обеспечения устойчивой работы РЦ.

Решением МЭК №77 от 1976 г. электромагнитная совместимость (ЭМС) определяется как способность устройств правильно функционировать в данной электромагнитной среде без внесения чрезмерных возмущений в эту среду. Отмечено далее, что проблема качества электроэнергии (КЭ) – составная часть проблемы ЭМС. В равной мере принято считать, что проблема высших гармоник (ВГ) – одна из важнейших составляющих КЭ и ЭМС. Круг вопросов проблемы ВГ – оценка ЭДС источника ВГ, их влияние на электрооборудование и возникающий при этом электромеханический ущерб, прогноз значений ВГ как электромагнитных помех в различных узлах электрических сетей

автоматики и связи, коррекция уровней помех (ГОСТ 13109-97).

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.** Сейчас прогрессивно распространяются на транспорте и промпредприятиях нагрузки, вебер- или вольт-амперные характеристики которых нелинейные (четырёхквadrантные и другие преобразователи частоты, силовые трансформаторы, сталеплавильные инверторные печи и т. п.). Они потребляют из сети ток с несинусоидальной или непериодической кривой, вызывая при этом нелинейные искажения напряжения. Такие несинусоидальные режимы оказывают отрицательное воздействие на (электрооборудование) средства автоматики и связи.

Наличие в тяговой и рельсовой сети ВГ на информационных частотах создает мешающее и опасное воздействие на рельсовые цепи СЖАТ и безопасность движения поездов.

По уровням гармоник тягового тока: требуется сделать сравнения расчетных амплитуд гармоник с амплитудами допустимых уровней в общем токе, потребляемом электровозом из контактной сети.

Опыт эксплуатации СЖАТ показывает, что наибольшему влиянию

обратного тягового тока подвержены РЦ, к которым подключается отсасывающий фидер тяговой подстанции (ТП). На рис. 1 представлена схема на участке между электровозом и подстанцией с обозначениями токов, напряжений, проводимостей утечек токов в землю и других элементов, обеспечивающих протекание тяговых токов. В частности,  $I_K$  – ток в контактном проводе и в цепи электровоза, токи  $I_0$ ,  $I_{II}$  в узле подключения фидера к РЛ справа и слева от ТП – токи  $I_L$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  и т. д. Другие параметры схемы замещения:  $q_0$  – проводимость подключаемых опор к одному рельсу, напряжение  $U_1$ ,  $U_2$  – рельс-земля,  $U_0$ ,  $U_e$  – потенциалы узлов в точке стекания токов электровоза и в точке протекания к фидеру подстанции. Назначение неперечисленных параметров СЗ (рис. 1) не требует пояснений.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Рассматриваемая здесь методика решения проблемы – оценки асимметрии РЛ – [1] дополнена расчетами для гармоник тонального спектра, с учетом сопротивлений рельсов типа Р65 и стальных рельсовых соединителей.

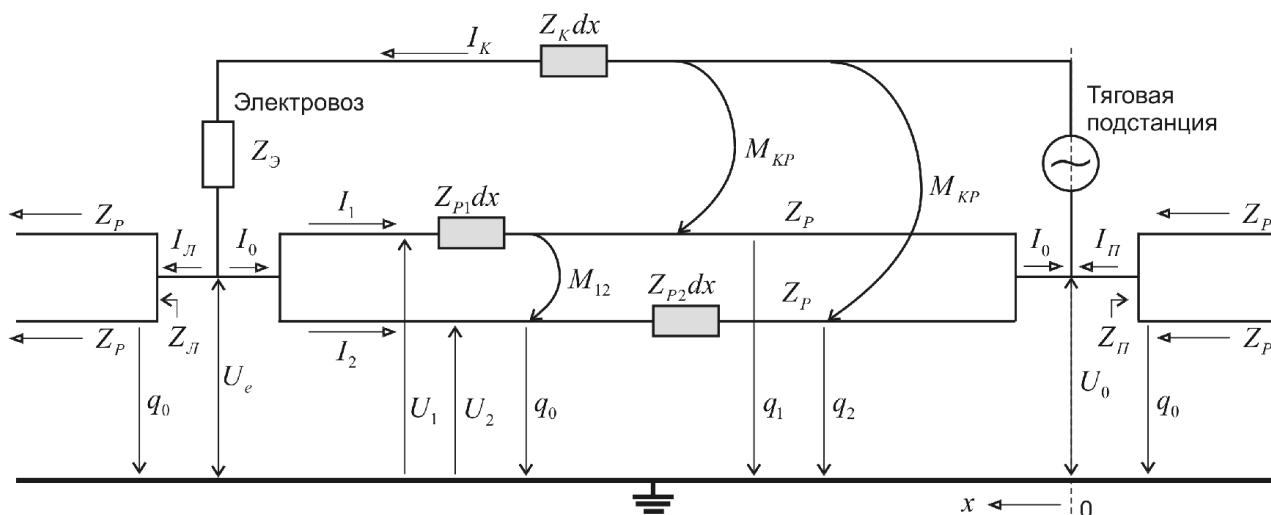


Рис. 1. Распределение токов и напряжений в рельсовой линии на участке электровоз – тяговая подстанция

Заметим, что приведенные в работе [1] уравнения охватывают основные воздействия тягового тока на аппаратуру РЦ при различных климатических факторах. Уравнения для оценки гармоник тягового тока учитывают взаимодействия трех цепей с распределенными параметрами, связанных взаимной индуктивностью: первый рельс – земля, второй рельс-земля и контактный провод – земля. При этом каждая цепь рельс-земля имеет проводимость  $g_1$  или  $g_2$  и удельное сопротивление  $Z_p$  току с частотой рассчитываемой гармоники, причем обе

цепи связаны взаимной индуктивностью  $M_{12}$  и имеют проводимость  $g_{12}$  по поверхности шпал (рис. 2). Цепь контактный провод – земля имеет удельное сопротивление  $Z_k$  и связана с рельсами взаимной индуктивностью  $M_{kp}$  (рис. 2). Величина тока в контактном проводе зависит в основном от нагрузки электровоза и мало зависит от параметров рельсовой линии, поэтому в расчетах ток  $I_k$  в наиболее тяжелом режиме тяги (рекуперативное торможение, набор скорости) задавался постоянной величиной.

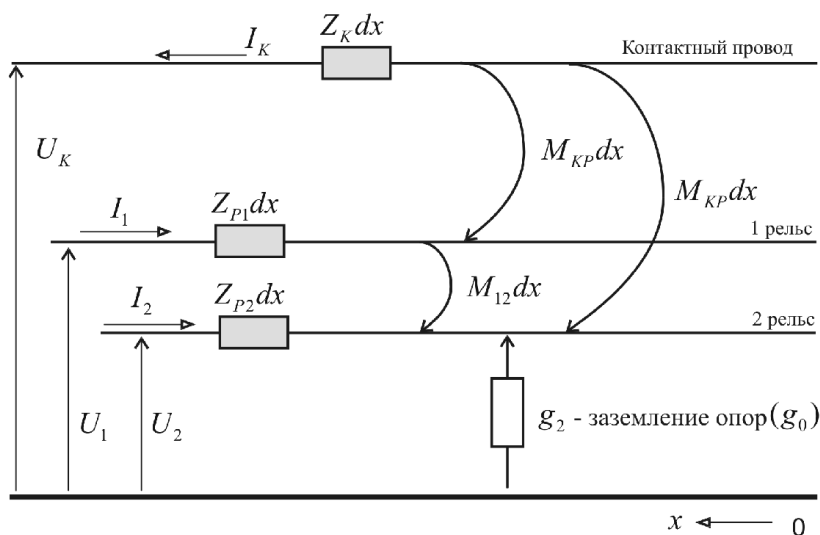


Рис. 2. Схема замещения участка  $dx$

**Определение цели и задачи исследования.** Методика расчета асимметрии по уравнениям [1] довольно сложная и трудоемкая. Между тем, практика показывает, что наибольшая асимметрия гармоник тягового тока в РЛ наблюдается зимой, где один из рельсов пути используется для заземления опор контактной сети. В этом случае, без существенных потерь точности, проводимостью одного рельса по отношению к земле  $g_1$  и проводимостью между рельсами  $g_{12}$  можно пренебречь, а принять лишь во внимание довольно

высокую удельную проводимость другой рельсовой нити  $g_0$  за счет подключения опор контактной сети, которая, как показали измерения, в течение года мало меняется по величине [2]. Для дальнейшего упрощения расчетов (например, поиска постоянных интегрирования при расчете по каждой гармонике) в случае применения двухниточных РЦ, считаем, что сопротивление нагрузки существенно меньше входного сопротивления рельсовых нитей, поэтому можно решать задачу распределения токов в рельсовых нитях при их коротком замыкании по концам цепи (рис. 3).

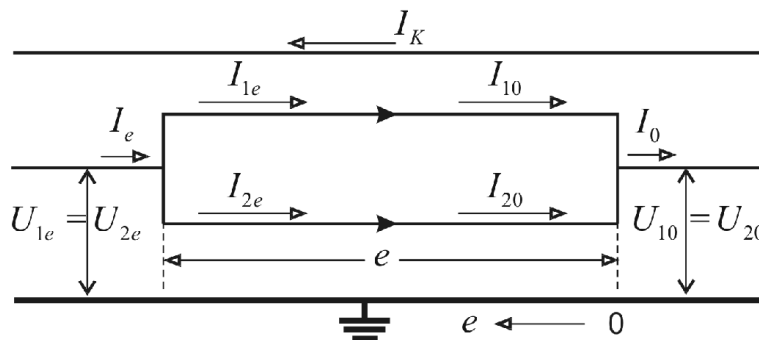


Рис. 3. Распределение токов и напряжений при КЗ по концам цепи

Из расчетной схемы замещения для рассматриваемого случая (рис. 1) видно, что ток  $I_K$  в контактном проводе течет в рельсах как на участке между электровозом и подстанцией, так и через заземления в рельсовых цепях, находящихся слева от

электровоза  $I_L$  и справа  $I_{II}$  от тяговой подстанции.

**Основная часть исследования.** С учетом принятых допущений в рельсовой цепи длиной  $\ell$  граничные условия выражаются так:

$$I_K = I_0 + I_{II} \text{ при } x = 0; I_K = I_e + I_L \text{ при } x = \ell, I_{II} = U_0 / Z_{II}, I_L = U_1 / Z_L, \quad (1)$$

где  $Z_{II}$  и  $Z_L$  – входные сопротивления рельсовой цепи по отношению к земле справа от подстанции и слева от локомотива соответственно.

Дифференциальные уравнения расчетной схемы (типа Гельмгольца), относительно тока  $I_2$  опущены (рис. 1), а постоянные интегрирования уравнения, выраженные через величину тока  $I_K$ , рассчитываются по формулам:

$$A_1 = \frac{I_K}{P} \left( 1 - 2 \frac{Z_{KP}}{Z_P + Z_M} \right) \left( \sinh(\gamma_0 \ell) + \frac{z_0}{Z_L} + \frac{z_0}{Z_{II}} \cosh(\gamma_0 \ell) \right), \quad (2)$$

$$B_1 = \frac{I_K}{P} \left( 1 - 2 \frac{Z_{KP}}{Z_P + Z_M} \right) \left( \cosh(\gamma_0 \ell) - 1 + \frac{z_0}{Z_{II}} \sinh(\gamma_0 \ell) \right), \quad (3)$$

где  $\gamma_0 = \sqrt{q_0 Z_P}$ ,  $z_0 = \sqrt{\frac{Z_P}{q_0}}$  – постоянная распространения сигнала и характеристическое сопротивление;

$$P = \sinh(\gamma_0 \ell) + 2 \frac{Z_P - Z_M}{Z_P + Z_M} \cdot \frac{\cosh(\gamma_0 \ell) - 1}{\gamma_0 \ell} + \left( \cosh(\gamma_0 \ell) + \frac{Z_P - Z_M}{Z_P + Z_M} \cdot \frac{\sinh(\gamma_0 \ell)}{\gamma_0 \ell} \right) \times \left( \frac{z_0}{Z_L} + \frac{z_0}{Z_{II}} \right) + \frac{z_0^2}{Z_L Z_{II}} \sinh(\gamma_0 \ell).$$

Входное сопротивление цепи длиной  $\ell_{\Pi}$  с проводимостью опор  $\gamma_{оп}$  справа от

подстанции выражается уравнением

$$Z_{\Pi} = z_0 \frac{\cosh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi}) + \frac{Z_P - Z_M}{Z_P + Z_M} \cdot \frac{\sinh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi})}{\gamma_{оп} \ell_{\Pi}}}{\sinh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi}) + 2 \frac{Z_P - Z_M}{Z_P + Z_M} \cdot \frac{\cosh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi}) - 1}{\gamma_{оп} \ell_{\Pi}}}, \quad (4)$$

а слева от электровоза таким же уравнением, но с учетом соответствующей длины цепи и проводимости опор.

Разность токов, создающая помеху около электровоза при  $x = \ell$  в цепи между подстанцией и поездом, определяется по формуле [1]

$$(I_2 - I_1)_{\ell} = \frac{I_K}{P} \left( 1 - 2 \frac{Z_{KP}}{Z_P + Z_M} \right) \left[ \sinh(\gamma_0 \ell) - 2 \frac{\cosh(\gamma_0 \ell) - 1}{\gamma_0 \ell} + \frac{z_0}{Z_{\Pi}} \left( 1 - \frac{\sinh(\gamma_0 \ell)}{\gamma_0 \ell} \right) + \frac{z_0}{Z_{\Pi}} \left( \cosh(\gamma_0 \ell) - \frac{\sinh(\gamma_0 \ell)}{\gamma_0 \ell} \right) \right], \quad (5)$$

а около тяговой подстанции при  $x = 0$

$$(I_2 - I_1)_0 = \frac{I_K}{P} \left( 1 - 2 \frac{Z_K}{Z_P + Z_M} \right) \left[ \sinh(\gamma_0 \ell) - 2 \frac{\cosh(\gamma_0 \ell) - 1}{\gamma_0 \ell} + \frac{z_0}{Z_{\Pi}} \left( 1 - \frac{\sinh(\gamma_0 \ell)}{\gamma_0 \ell} \right) + \frac{z_0}{Z_{\Pi}} \left( \cosh(\gamma_0 \ell) - \frac{\sinh(\gamma_0 \ell)}{\gamma_0 \ell} \right) \right]. \quad (6)$$

В рельсовой цепи справа от подстанции, у места подключения

отсасывающего фидера, разность токов определяется так:

$$(I_2 - I_1)_{оп} = I_{\Pi} \frac{\sinh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi}) - 2 \frac{Z_M}{Z_P + Z_M} \cdot \frac{\cosh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi}) - 1}{\gamma_{оп} \ell_{\Pi}}}{\sinh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi}) + 2 \frac{Z_P - Z_M}{Z_P + Z_M} \cdot \frac{\cosh(\gamma_{оп} \ell_{\Pi}) - 1}{\gamma_{оп} \ell_{\Pi}}}, \quad (7)$$

где суммарный ток  $I_{\Pi}$  в рельсовой цепи справа от подстанции находится по формуле:

$$I_{\Pi} = \frac{I_K}{P} \left( 1 - 2 \frac{Z_{KP}}{Z_P + Z_M} \right) \frac{z_0}{Z_{\Pi}} \left( \cosh(\gamma_0 \ell) + \frac{z_0}{Z_{\Pi}} \sinh(\gamma_0 \ell) \right). \quad (8)$$

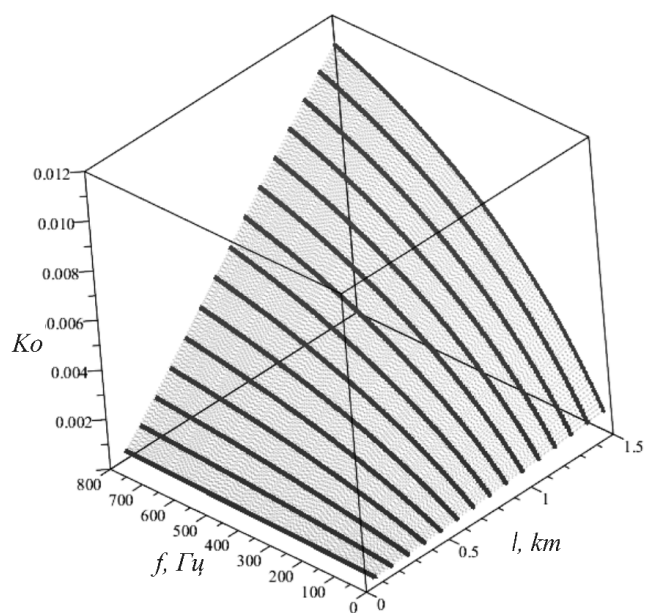
**Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Расчетные данные, характеризующие численные значения

гармоник тягового тока, представлены на рис. 4 в виде коэффициентов  $K_0$  и  $K_{\Pi}$ , как это выполнено в [1] для двухниточных РЦ. Эти коэффициенты представляют собой

отношение полуразности токов гармоника на концах РЦ к току этой гармоника в контактном проводе  $I_K$  в зависимости от длины РЦ, частоты гармоника  $\omega_i$  и удельной проводимости опор контактной сети  $g_0$ . Коэффициенты, таким образом, показывают долю тока гармоника в контактном проводе и этого тока, содержащегося в РЛ при максимальном сопротивлении изоляции рельсов от земли, т. е.  $g \rightarrow \min$ .

Коэффициент

$$K_0 = \frac{(I_2 - I_1)_0}{2I_K} \quad (9)$$



относится к РЦ, примыкающей к фидеру тяговой подстанции и находящейся на участке между электровозом и ТП, а коэффициент

$$K_{II} = \frac{(I_2 - I_1)_{0II}}{2I_K} \quad (10)$$

определяет помеху в РЦ, примыкающей к фидеру тяговой подстанции с противоположной от электровоза стороны.

Уровни помех рассчитаны по приведенным формулам (5) – (8) для каждого значения проводимости  $q_0$  (0,25; 0,5 и  $1 \text{ } 1/\text{Ом}\cdot\text{км}$ ), РЦ имеют одну длину ( $l = 0,5 - 0,8 - 1,0$  и  $1,5$  км) и одну проводимость  $g_0$  всех РЦ.

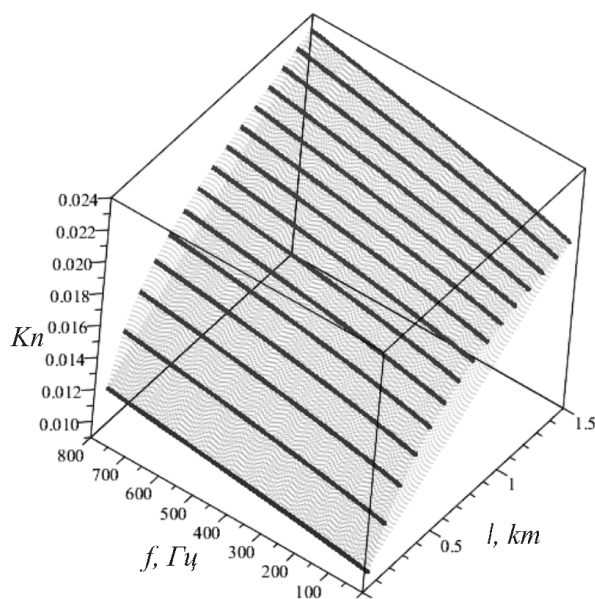


Рис. 4. Зависимости изменения коэффициента асимметрии  $K_0, K_{II}$  от частоты и длины РЦ при  $q_0 = 0,25$

Параметры рельсовых линий рассчитаны для рельсов типа Р65 при температуре  $20^\circ\text{C}$  и наибольшей проводимости земли (для зимних условий  $g \Rightarrow 1 \text{ См}/\text{км}$ ), при которой ожидается максимальная помеха, создаваемая каждой гармоникой.

Из приведенных рисунков следует, что коэффициенты помех монотонно

растут: при росте величины частоты гармоник, при увеличении постоянной распространения  $\gamma_0$  с учетом опор контактной сети, а также с увеличением длины РЦ. При этом, при частотах ТРЦ до 800 Гц скорость возрастания помехи при заданной длине РЦ замедляется. Рост коэффициентов помех в зависимости от

упомянутых факторов объясняется тем, что с ростом  $\gamma_0$  растет та часть тока гармоник, которая протекает к тяговой подстанции через землю и создает тем самым асимметрию токов в рельсовых нитях.

Коэффициент  $K_0$  при прочих равных условиях меньше по величине, чем коэффициент  $K_{II}$ , несмотря на то, что ток  $I_0$ , текущий по рельсам между электровозом и тяговой подстанцией, больше тока  $I_{II}$ , попадающего в соседнюю РЛ с фидером тяговой подстанции РЦ через землю. Этот эффект объясняется явлением индуктирования тока в рельсы из контактного провода, способствуя тем самым уравниванию токов в РЦ, хотя одна из нитей имеет большую проводимость в несколько раз за счет заземлений опор.

С ростом  $q_0 \ell$  достигаются предельные значения коэффициентов, поскольку из формул (5) и (7) следует, что при  $\ell \rightarrow \infty$ ,  $K_0 \rightarrow \frac{1}{4} \left( 1 - 2 \cdot \frac{Z_P}{Z_P + Z_M} \right)$ , причем слагаемое

$\frac{Z_P}{Z_P + Z_M}$  мало зависит от частоты и примерно равно 0,26, а максимум коэффициента  $K_0 \rightarrow 0,13 \div 0,14 \approx K_0 + K_{II}$ .

Заметим, что на двухниточном перегоне при симметричном подключении путей к отсасывающему фидеру обратный ток электровозов от подстанции, протекающий в каждой из четырех примыкающих к фидеру рельсовых цепей, равен  $I_{КС} = \frac{I_{ТП(1\text{путный})}}{2} = \frac{I_{ТП(2\text{путный})}}{4}$  (рис. 5), причем на однопутном участке расчетный ток контактной сети равен половине тока подстанции. Иначе говоря, токи между рельсовыми нитями на каждом пути остаются одинаковыми, не зависимо от того, есть ли второй путь с расчетным током в контактном проводе или один путь с теми же токами. При этом, как показывают измерения, достаточно оценить влияние помех при двух электровозах,двигающихся по одному пути.

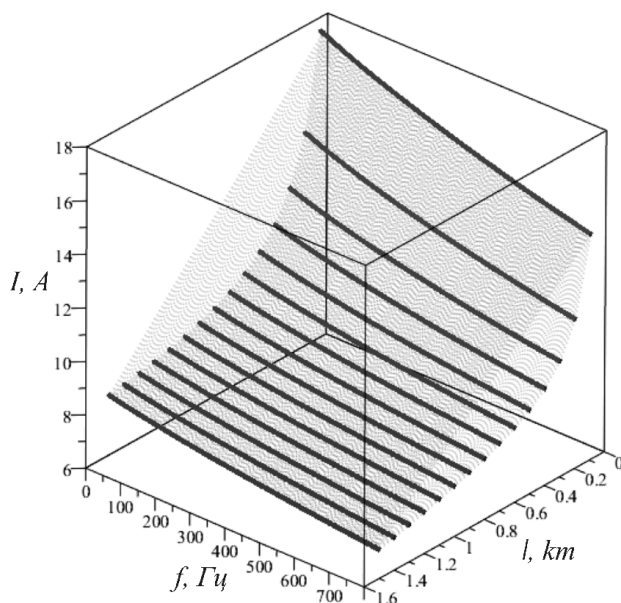


Рис. 5. Зависимости изменения тока помехи от частоты и длины РЦ при  $q_0 = 0,25$

Заметим также, что расчеты уровней помех, выполненных выше, не учитывают

равности фазных напряжений, т. е. их несимметрию как по форме, так и по



величине. Особенно это касается участков стыкования электротяги постоянного и переменного токов. Отсюда следует, что

уровни помех могут иметь и большие уровни значений.

#### *Список использованных источников*

1. Брылеев, А.М. Устройства и работа рельсовых цепей [Текст] / А.М. Брылеев, А.В. Шишляков, Ю.А. Кравцов. – М.: Транспорт, 1966. – 264 с.
2. Вахнин, М.И. Устройства СЦБ при электрической тяге переменного тока [Текст] / М.И. Вахнин, Н.Ф. Пенкин, М.А. Покровский // Тр. ВНИИЖТ. – 1956. – № 126. – 217 с.
3. Купфмюллер, К. Основы теоретической электротехники [Текст] / К. Купфмюллер. – М.: ГЭИ, 1960. – 217 с.
4. Разгонов, А.П. Защита рельсовых цепей в зоне стыкования систем электротяги [Текст] / А.П. Разгонов, В.А. Дьяков, А.Ю. Журавлев, С.А. Разгонов // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. — С. 19-22.
5. Рельсовые цепи магистральных железных дорог [Текст]: справочник / под ред. В.С. Аркатова. – М.: Миссия-М, 2006. – 496 с.
6. Разгонов, А.П. О влиянии электрической дуги на токосъемники электровоза при гололёде на рельсовые цепи [Текст] / А.П. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1998. – № 6. – С. 36-39.
7. Щека, В.І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл [Текст] / В.І. Щека, І.О. Романцев, К.І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 24-28.
8. Mohamed, F.P. A novel approach in the measurement of high frequency disturbances from very large electrical systems [Text] / F.P. Mohamed, W.H. Siew, K.Y. Liu. // *Electromagnetic Compatibility Magazine, IEEE* 3.2. – 2014. pp. 46-50. doi: 10.1109/MEMC.2014.6849543.
9. Place, C. Managing rolling stock EMC [Text] / C. Place, D. Hayes // *Electromagnetic Compatibility in Railways. IET Seminar*. – London. – 2009. – P. 1-8.
10. Holmstrom, F.R. Rail transit EMI-EMC Electromagnetic Compatibility [Text] / F.R. Holmstrom, D. Turner, E. Fernald // *Magazine IEEE*. – 2012. - Vol. 1. – Iss. 1. - P. 79–82. doi: 10.1109/MEMC.2012.6244954.
11. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management*. Springer-Verlag, Berlin, 2013. – 528 p.
12. Rhee, Eugene, Changjae Kim. *Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem* [Text] // *International Journal of Software Engineering & Its Applications*. Vol.8, No.5. - 2014. pp.115-126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10
13. Test Analysis and Modeling of Power Frequency Magnetic-Field Environment in Carbodies of Electrified Trains [Text] / F ZHU, LIU Guanghui, YE Jiaquan, DU Hui // *J. of Southwest Jiaotong University*. –2015. – Vol. 50. – P. 400–404. doi: 10.3969/j.issn.0258-2724.2015.03.002.

Рецензент д-р техн. наук, професор В.І. Гаврилюк

---

Журавльов Антон Юрійович, асистент кафедри автоматичної, телемеханіки та зв'язку Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Тел. (067) 990-76-51. E-mail: anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177.

Zhuravlev Anton Yuryevich, assistant of the dep. «Automation, remote control and communication», Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan. Tel. (067) 990-76-51. E-mail: anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177.

Прийнята 12.02.2016 р.