

УДК 621.331

ГАВРИЛЮК В. І., д.ф.-м.н., професор (ДНУЗТ)

Моделирование электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на рельсовую линию в присутствии экранирующего провода

Введение

Скоростные электропоезда является мощным потребителем электрической энергии, которые перемещаются с большой скоростью в пространстве, вследствие чего в линиях железнодорожной автоматики и связи, расположенных вблизи железной дороги, наводятся значительные индуктивные токи, способные оказать мешающее и даже опасное влияние на их работу. Методы защиты кабельных линий и металлических конструкций от влияния тягового тока описаны в [1-11]. Исследованию индуктивных помех в рельсовых линиях (РЛ) двухпутного участка железной дороги уделено значительно меньшее внимание. Значимость этой проблемы в последнее время возросла в связи с предложенной концепцией организации скоростного движения поездов по направлениям, проходящим через дороги с разным родом тягового тока [12]. Предложено параллельно с существующими железнодорожными путями с электротягой постоянного тока прокладывать скоростные магистрали с тягой переменного тока. Это приведет к увеличению электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока частотой 50 Гц на расположенные вблизи рельсовые цепи с сигнальным током 50 Гц.

Для уменьшения электромагнитного влияния электрифицированных железных дорог на линии железнодорожной автоматики и связи было предложено использовать отсасывающие трансформаторы, автотрансформаторы [4], экранирующие провода (ЭП) [7-11]. В Украине тяговой сетью с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП) оборудован железнодорожный участок Тернополь - Красное [10].

Однако система с пассивным экранирующим проводом имеет низкую экранирующую эффективность, поскольку не учитывает реальный спектр помех, наводимых в рельсовой цепи соседнего пути. Для повышения эффективности экранирования помех в линиях связи, предложена система с активным экрани-

рующим проводом, по которому пропускают ток от устройства компенсации электромагнитных помех [7-9]. Однако такое устройство не эффективно для компенсации помех в рельсовых цепях, поскольку рельсовые линии (в отличие от линий связи) соединены с землей через небольшое сопротивление изоляции балласта и обратный тяговый ток в них существенно изменяется по длине РЛ. Это приводит к изменению электромагнитных помех, наведенных в РЛ. Кроме того, РЛ сегментирована на отдельные рельсовые цепи (РЦ), режимы работы и частоты сигнального тока в которых могут отличаться. Таким образом, компенсацию электромагнитных помех в РЛ, подверженной влиянию, необходимо проводить с учетом гармонического состава тока помех в ней. Устройство компенсации помех в рельсовой линии предложено в [12], однако исследования рационального расположения ЭП для эффективного уменьшения помех не проводилось.

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка математической модели тяговой сети двухпутного участка с разными родами тягового тока на соседних путях с использованием ЭП, которая позволит разработать рекомендации по его рациональному размещению.

Математическая модель

Электрическая эквивалентная схема тяговой сети двухпутного участка с ЭП приведена на рис. 1.

На рисунке приняты следующие обозначения: $\dot{U}_1(x), \dot{U}_2(x), \dot{U}_4(x), \dot{U}_5(x)$ – комплексные значения напряжений на рельсовых линиях относительно земли, $\dot{U}_3(x), \dot{U}(x)_5$ – комплексы напряжений на контактных

проводах двух путей, $I_n(x)$, $n=1..6$ – комплексы токов в линиях; Z_{11} , Z_{22} – продольные

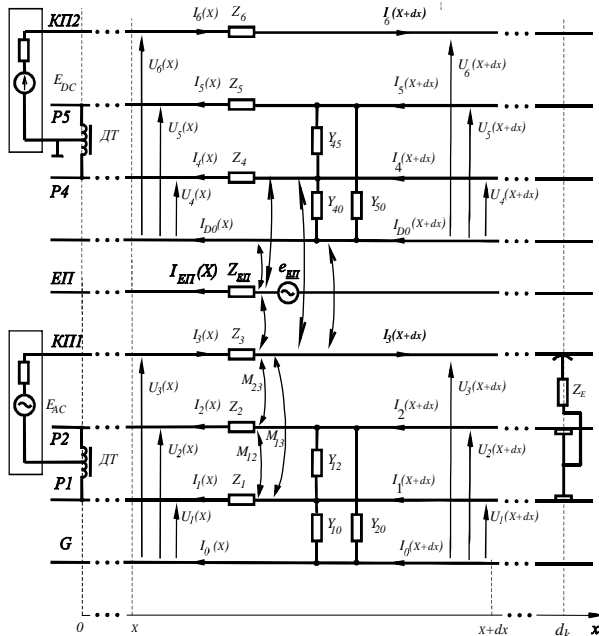


Рисунок 1 – Эквивалентная схема тяговой сети двухпутного участка с ЭП

комплексные сопротивления контактных проводов каждого пути на единицу (1 км) длины (н.е.д.); Z_{33} , Z_{44} , Z_{55} , Z_{66} – продольные комплексные сопротивления рельсовых нитей для первого и второго пути, соответственно (н.е.д.); Y_{ij} – комплексные поперечные адмитансы н.е.д. между линиями i и j , $Z_{kl} = j\omega M_{kl}$, $k \neq l$ – комплексные н.е.д. импедансы взаимной индукции между линиями, в которых через M_{kl} обозначен коэффициент взаимной индукции между k и l линиями.

Для построения модели использован формализм многопроводных линий с распределенными параметрами [13, 14]. Уравнения для многопроводных линий запишем в матричном виде

$$\frac{d\vec{U}}{dx} = \underline{Z}\vec{I}, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{I}}{dx} = \underline{Y}\vec{U}, \quad (2)$$

где $\vec{U} = \{U_j\}$, $\vec{I} = \{I_j\}$ – векторы комплексных напряжений и токов в линиях,

$\underline{Z} = \{Z_{ij}\}$ при $(i = j)$ – матрица погонных (н.е.д.) комплексов продольных импедансов линий,

$\underline{Y} = \{Y_{ij}\}$ – матрица погонных (н.е.д.) комплексов поперечных адмитансов между линиями $i, j = 1..6$ ($i \neq j$).

Граничные условия запишем в виде:

$$U_3(x=0) = U_{T11}, \quad U_6(x=0) = U_{T21},$$

$$U_1(x=0) = U_2(x=0) = 0,$$

$$U_4(x=0) = U_5(x=0) = 0,$$

где U_{T11} , U_{T21} – напряжения на шинах тяговых подстанций.

Для сравнения эффективности применения активного и пассивного экранирующего провода (АЭП и ПЭП) моделирование проводили для этих двух видов ЭП отдельно. Граничные условия для АЭП и ПЭП запишем в виде: $U_{\bar{A}i}(x=x_{r1}) = U_{\bar{A}i}(x=x_{r2}) = 0$ – для пассивного ЭП, $I_{\bar{A}i}(x=x_{r2}) = I_{SW}$ – для активного ЭП, где $I_{SW} = K_{PE} I_{DE}(x_{r2})$ – ток в активном ЭП, $I_{DE}(x_{r2})$ – обратной тяговой ток в рельсовой линии второго пути с электротягой переменного тока. Значение коэффициента K_{PE} задает регулирующий элемент. При моделировании его значение варьировали. Длину рельсовой цепи выбирали максимально возможной – 2,6 км, значение удельной проводимости земли изменяли при моделировании в пределах $10^2 \dots 10^3$ См/км.

Решение системы (1), (2) запишем в виде

$$\vec{U} = \exp(-\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}x)\vec{U}_a + \exp(\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}x)\vec{U}_b,$$

$$\vec{I} = \underline{Z}^{-1}\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}\left[\exp(-\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}x)\vec{U}_a - \exp(\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}x)\vec{U}_b\right]$$

где \vec{U}_a , \vec{U}_b – соответственно, векторы падающей и отраженной волны напряжения, которые определяются выражениями

$$\vec{U}_a = \frac{\vec{U}_{T11} + \underline{Z}_C \vec{I}_{T11}}{2},$$

$$\vec{U}_b = \frac{\vec{U}_{T11} - \underline{Z}_C \vec{I}_{T11}}{2},$$

где \vec{I}_{T11} – вектор токов на входе системы,

$\underline{Z}_C = \underline{G}^{-1}\underline{Z}$ – матрица характеристических (волновых) импедансов линии,

$\underline{G} = \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}$ – матрица констант распространения, а

$\underline{Y}_C = \underline{Z}_C^{-1}$ – матрица характеристических адмитансов систем.

Решение уравнений проводили с помощью пакета MatLab. При моделировании определяли разностный ток асимметрии в двух рельсовых нитях $I_{rd} = |I_{r1} - I_{r2}|$, поскольку именно этот ток влияет на путевой приемник рельсовой цепи.

Результаты

На рис. 2 приведен график наведенного разностного тока помехи частотой 50 Гц в рельсовой линии с сигнальным током 50 Гц (в РЦ, подверженной ЭМ влиянию) в зависимости от ширины сближения двух путей с различными родами тягового тока.

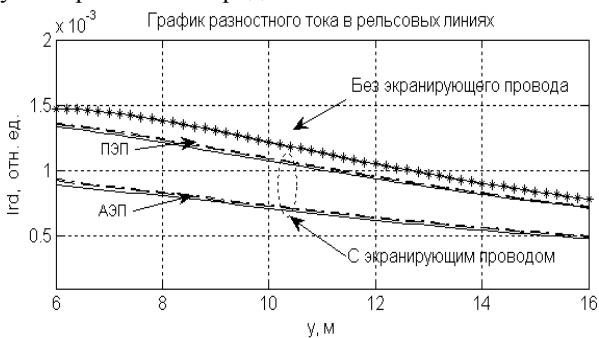


Рисунок 2 – Зависимость тока I_{rd} в РЛ от ширины сближения путей y

Видно, что при уменьшении ширины сближения y ток I_{rd} увеличивается, достигая 1,5 А при ширине сближения 6 м. Уровни наведенных в РЛ помех в диапазоне частот 46-54 Гц и действующим значением более 1,3 А, согласно нормативным документам, могут привести к опасному сбою в работе РЦ. Применение пассивного экранирующего провода уменьшает ток помехи частотой 50 Гц в РЛ ниже 1 А при ширине сближения 12 м (рис. 1), но при уменьшении y до 6 м, ток I_{rd} увеличивается до ~1,3 А, что также может привести к опасному сбою в работе РЦ. Увеличение проводимости земли от 10⁻³ до 10⁻² См/км приводит к незначительному уменьшению тока помехи в РЛ.

Применение АЭП с предложенным способом регулирования компенсирующего тока в нем позволят уменьшить уровень наведенной помехи частотой 50 Гц менее 1 А при ширине сближения путей менее 6 м (рис. 1), что обеспечивает безопасную работу РЦ.

На рис. 3 приведена зависимость разностного тока I_{rd} в рельсовой линии от высоты подвеса ЭП h_e и ширины сближения путей y . Из рисунка видно, что при уменьшении ширины сближения y менее 8 м на зависимости I_{rd} от h_e наблюдается минимум при

$h_e \approx 5$ м. При увеличении $y \geq 10$ м влияние h_e на индуцируемый в РЦ ток помехи I_{rd} уменьшается.

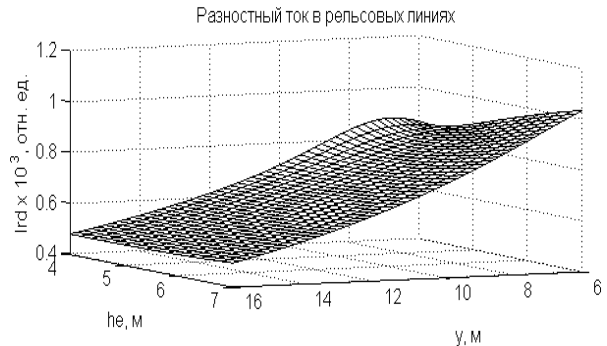


Рисунок 3 – Зависимость тока I_{rd} в рельсовой линии от высоты подвеса ЭП h_e и ширины сближения путей y

Для анализа эффективности экранирования РЦ с помощью ЭП введем коэффициент ослабления индуцированного тока в рельсовых линиях за счет применения ЭП (коэффициент экранирующего действия ЭП)

$$K_{OS} = 1 - \frac{I_{rdЭП}}{I_{rdБЭП}}$$

где $I_{rdБЭП}$, $I_{rdЭП}$ – соответственно, индуцированный ток в РЛ без АЭП и при использовании АЭП.

На рис. 4, 5 приведены зависимости K_{OS} от h_e и проводимости земли S_g при двух значениях ширины сближения y – 6 и 10 м.

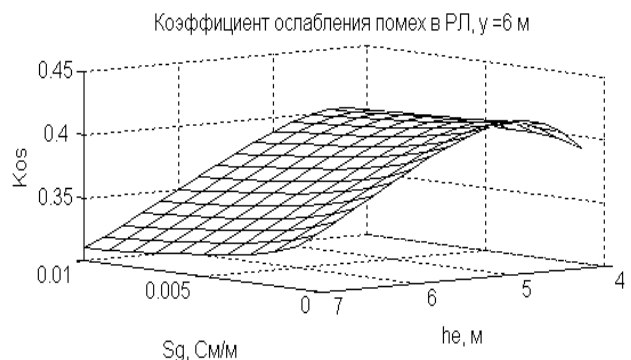


Рисунок 4 – Зависимость K_{OS} от высоты h_e и удельной проводимости земли S_g при $y = 6$ м

На коэффициент экранирующего действия K_{OS} при применении АЭП значительно влияла высота подвеса экранирующего провода h_e , причем максимум

коэффициента экранирования K_{OS} в зависимости от ширины сближения y и проводимости земли S_g .наблюдался при разных значениях высоты подвеса провода h_e .

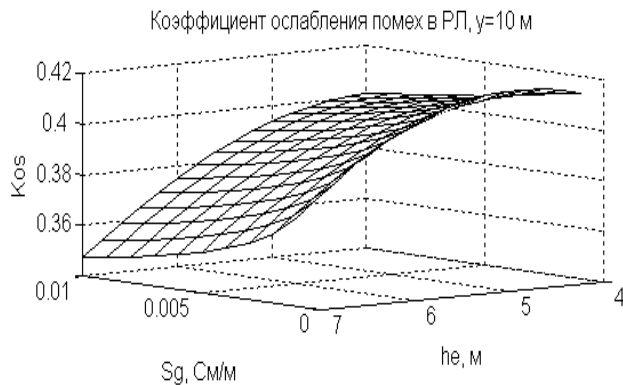


Рисунок 5 – Зависимость K_{OS} от высоты h_e и удельной проводимости земли S_g при $y = 10$ м

Зависимости коэффициента K_{OS} от высоты подвеса ЭП h_e для трех значений проводимости земли ($S_g = 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}$ См/м) и трех значений ширины сближения путей y (6, 8, 10 м) с разными родами тягового тока приведены на рис. 6.

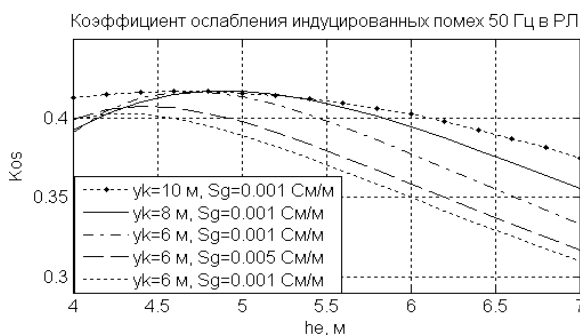


Рисунок 6 – Зависимость коэффициенту K_{OS} от высоты h_e при разных значениях y и S_g

Из рис. 6 видно, что значение h_e , при котором K_{OS} принимает максимальное значение, изменяется в зависимости от ширины сближения y и проводимости земли S_g . Максимумы кривых $K_{OS}(h_e)$ при различных значениях y и S_g не являются острыми. Это позволяет выбрать некоторое значение высоты подвеса

АЭП (~ 5 м), при котором экранирующее действие АЭП для различных значений y и S_g является достаточно эффективным и слабо зависит от параметров y и S_g . При высоте подвеса АЭП ~ 5 м наблюдалось эффективное ослабление влияния помех, как при косом сближении, так и при параллельном прохождении путей с различными родами тягового тока при ширине сближения $y = 8 - 10$ м, независимо от проводимости земли.

Выводы

Разработана математическая модель тяговой сети двухпутного участка железной дороги с разными родами тягового тока на соседних путях с применением АЭП для компенсации наведенных помех в рельсовой линии. Показано, что применение АЭП с предложенным способом регулирования компенсирующего тока в нем позволяет обеспечить безопасный уровень наведенных помех (менее 1 А) при ширине сближения путей до 6 м, и высоте подвеса АЭП 5 м.

Литература

1. *Марквардт К.Г.* Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К.Г. Марквардт. – М.:Транспорт, 1982. – 528 с.
2. *Карякин Р. Н.* Тяговые сети переменного тока / Р.Н. Карякин. – М.: Транспорт, 1967. - 279с.
3. *Бадер М.П.* Электромагнитная совместимость / М.П.Бадер. – М.:УМК МПС, 2002. – 638 с.
4. *Котельников А.В.* Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А.В. Котельников, А.В. Наумов, Л.П. Слободянок. – М.:Транспорт, 1990. – 215с.
5. *Косарев А.Б.* Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока / А.Б. Косарев– М.: Интекст, 2004.–272 с.
6. *Павлов И.В.* Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока / И.В.Павлов.– М.: Транспорт, 1965.- 265 с.
7. *Бочев, А. С.* Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводами [Текст] / А. С. Бочев, В. В. Мунькин, Е. П. Фигурнов // Железные дороги мира. - 1997. - №11. - С. 8-12.
8. *Бочев, А. С.* Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного / А. С. Бочев, Т. П. Добровольскис, В. А. Мишель // Вестник ВНИИЖТа. - 1990. - № 8. - С. 17-20.

9. *Мунькин В.В.* Электротяговая сеть повышенной эффективности / В.В. Мунькин, А.С. Бочев, Е.П.Фигурнов //Железнодорожный транспорт.– 1997.–№ 11.- С. 11-15.
10. *Корниенко В.В.* Испытания тяговой сети с экранирующими и усиливающими проводами / В.В. Корниенко // Залізничний транспорт України. - 2001.– № 5.-С.11-14.
11. *Добровольскис Т.П.* Электромагнитные процессы в тяговых сетях переменного тока с экранирующими и усиливающими проводами / Т.П. Добровольскис, А.Н.Артюх, А.В.Косарев, Б.И.Косарав // Вестник ВНИИЖТа. - 1992.–№ 2.-С. 21-23.
12. *Завгородний А.В.* Проблеми впровадження швидкісного руху на Придніпровській залізниці. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: праці 65 міжнар. науково-практич.конф., 19-20 травня 2005 р., м. Дніпропетровськ. – Д.: ДНУЗТ, 2005. – С. 292
13. *Гаврилюк В.І., Завгородний А.В.* Модель распределения гармоник тягового тока в рельсовой линии линии // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2009. - № 4. - С. 40-43.
14. *Гаврилюк В.І., Завгородний О.В.* Ймовірнісна модель впливу тягового струму на рейкові кола // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2010. - № 4. - С. 73-75.

Резюме

Разработана математическая модель тяговой сети двухпутного участка железной дороги с разными родами тягового тока на соседних путях с применением АЭП для компенсации наведенных помех в рельсовой линии, на основе которой проведен рациональный выбор параметров системы

Розроблено математичну модель тягової мережі двоколіїної ділянки залізниці з різними родами тягового струму на сусідніх коліях із використанням АЭП для компенсації наведених завад у рейковій лінії, на основі якої проведений раціональний вибір параметрів системи

The mathematical model of a two-tracks rail network with different kinds of a traction current on its was developed on which bases the rational choice of system parameters with using of an active shielding wire for induced handicapes mitigation was carried out

Ключевые слова: тягова мережа, електромагнітні завади, рейкові кола

Поступила 04.07.2011 г.