

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Проведено аналіз впливу системи тягового електропостачання двоколіїної ділянки залізниці з різними видами електричної тяги на двох коліях на роботу рейкових кіл на основі розробленої математичної моделі, що враховує індуктивний вплив струму в контактному проводі та розтікання струму в землі. Проведено розрахунки зворотного тягового струму та потенціалу рейок.

Проведен анализ влияния системы тягового электроснабжения двухпутного участка железной дороги с различающимися видами электрической тяги на двух путях на работу рельсовых цепей на основе разработанной математической модели, которая учитывает индуктивное влияние тока в контактном проводе и растекание тока в земле. Проведены расчеты обратного тягового тока и потенциала рельсов.

The paper carries out analysis of the influence of traction power supply system for double-track railway section with different kinds of traction on the work of rail circuits on the basis of developed mathematical model. The model takes into account inductive influence of current in the contact wire and the current «spillage» in the ground. Calculations have been made of reverse tractive current and the potential of rails.

### Введение

Происходящее в последние годы в Украине техническое переоснащение железных дорог с вводом в эксплуатацию новых магистралей с ускоренным, а в ближайшей перспективе и со скоростным движением поездов, развитие сети международных транспортных коридоров, разработка новых типов подвижного состава (электровозов и вагонов с импульсными преобразователями), внедрение новых компьютерно-информационных систем регулирования движения поездов [1], – сделало особо актуальной проблему обеспечения электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения (СТЭ) с устройствами железнодорожной автоматики и связи.

При проектировании скоростных магистралей на участках с электрической тягой постоянного тока предложено параллельно существующим путям проложить новые для скоростного движения с электротягой переменного тока. В связи с этим возникает проблема обеспечения их электромагнитной совместимости. Однако вопросы электромагнитного взаимодействия железнодорожных путей с различными видами электротяги малоизучены. Нормативных документов по допустимым уровням влияния тягового электроснабжения на линии автоматики в Украине нет, а для оценки влияния СТЭ на линии связи используют устаревшие нормативные документы, не учитывающие техническое переоснащение отрасли [2].

### Математическая модель

Система тягового электроснабжения для каждого пути двухпутного участка дороги состоит из контактного провода, несущего троса и двух рельсов, связанных через сопротивления утечки с землей (рис. 1). Кроме того, к контактной подвеске может быть параллельно присоединен усиливающий провод [2].

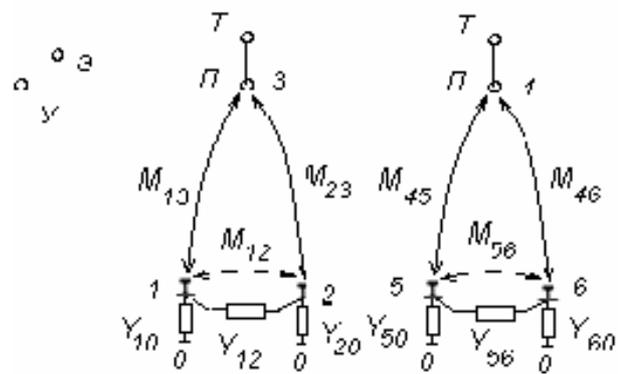


Рис. 1. Схематическое представление расположения линий двухпутного участка: У – усиливающий провод; Э – экранирующий (обратный) провод; Т – несущий трос; П – контактный провод; 1, 2, 5, 6 – рельсы

Напряжение на контактном проводе наводит в рельсовой линии электростатические потенциалы относительно земли (электрическое влияние), переменный ток, протекающий в проводе при движении электровоза, наводит продольную электродвижущую силу (ЭДС), которая вызывает протекание в рельсовых нитках тока (электромагнитное влияние). Обрат-

ный тяговый ток, протекающий по рельсовой линии, оказывает кондуктивное влияние. Поскольку сопротивление изоляции рельсов от земли не достаточно высоко, часть тягового тока стекает с рельс в землю и оказывает кондуктив-

ное влияние на работу соседних рельсовых цепей. Для адекватного описания электромагнитных процессов в системе тягового электроснабжения используют эквивалентную схему в виде системы многопроводных длинных линий [2–7].

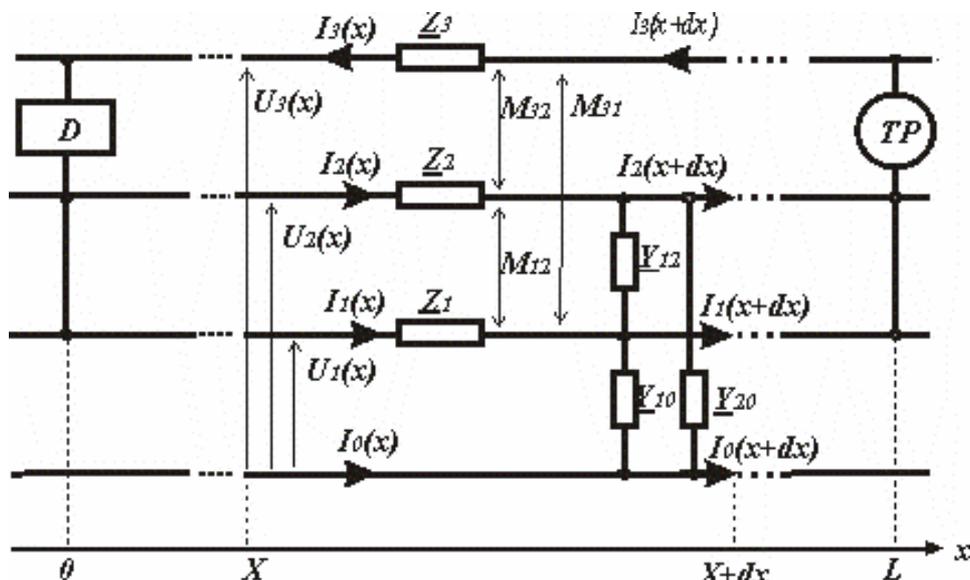


Рис. 2. Схема тягового электроснабжения одного пути

На рис. 2 приведена эквивалентная схема системы тягового электроснабжения для одного пути двухпутного участка железной дороги. Нулевая линия соответствует проводимости земли, линии 1, 2 – рельсовым нитям с потенциалами  $U_1$ ,  $U_2$  относительно земли, линии 3 – контактному проводу с потенциалом  $U_3$ . Комплексные проводимости между рельсовыми нитями первого и второго пути и частичные проводимости между каждым рельсом и землей обозначены соответственно через  $Y_{12}$ ,  $Y_{10}$ ,  $Y_{20}$ . Взаимные индуктивности между линиями  $i$  и  $j$  обозначены через  $M_{ij}$ . Активной и емкостной проводимостью между контактными проводами и рельсами в данном исследовании пренебрегаем вследствие их малости. Дифференциальные уравнения для напряжений  $U_i$  и токов  $I_i$  ( $i = 0 \dots 4$ ) имеют вид [2–7]:

$$\frac{d\dot{U}_1}{dx} = \underline{Z}_{11}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{12}\dot{I}_2 - \underline{Z}_{13}\dot{I}_3, \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{U}_2}{dx} = \underline{Z}_{21}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{22}\dot{I}_2 - \underline{Z}_{23}\dot{I}_3, \quad (2)$$

$$\frac{d\dot{U}_3}{dx} = \underline{Z}_{31}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{32}\dot{I}_2 - \underline{Z}_{33}\dot{I}_3, \quad (3)$$

$$\frac{d\dot{I}_1}{dx} = -\underline{Y}_{11}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{12}\dot{U}_2, \quad (4)$$

$$\frac{d\dot{I}_2}{dx} = \underline{Y}_{21}\dot{U}_1 - \underline{Y}_{22}\dot{U}_2, \quad (5)$$

где

$$\underline{Z}_{11} = R_1 + jX_{L1}, \quad \underline{Z}_{22} = R_2 + jX_{L2},$$

$$\underline{Z}_{31} = R_3 + jX_{L3},$$

$$Y_{11} = Y_{12} + Y_1, \quad Y_{11} = Y_{22} + Y_2.$$

При написании этих уравнений пренебрегли электромагнитным влиянием сигнального тока в рельсах на ток в контактном проводе вследствие его малости. Для двухпутного участка запишем дифференциальные уравнения в матричном виде

$$\frac{d\bar{U}}{dx} = |\underline{Z}| \bar{I}, \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{I}}{dx} = |\underline{Y}| \bar{U}, \quad (7)$$

где  $\bar{U}$ ,  $\bar{I}$  – векторы напряжения и тока;  $|\underline{Z}|$ ,  $|\underline{Y}|$  – матрицы взаимных сопротивлений и проводимостей  $Z_{ij}$ ,  $Y_{ij}$ . Значения активного и ре-

активного сопротивлений рельсовой нити для тягового и сигнального токов зависят от значения и частоты тока и приведены в литературе [3]. Для расчета можно использовать формулы Л. Неймана, которые дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными [7]

$$R_l = \frac{l}{u} \sqrt{\mu_e \rho \omega}, \quad X_l = 0,6 \frac{l}{u} \sqrt{\mu_e \rho \omega}, \quad (8)$$

где  $l$  – длина проводника;  $u$  – периметр его сечения;  $\rho$  – удельное сопротивление стали;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $\mu_e$  – магнитная проницаемость рельсовой стали, значение которой определяется экспериментально по измеренной кривой намагничивания.

Полное погонное (на 1 км длины) сопротивление рельсовой нити можно определить по формуле

$$Z_{ii} = (r_i + r_c) + X_i, \quad (9)$$

где  $r_i$ ,  $X_i$  – соответственно активное и реактивное сопротивление рельсовой нити длиной 1 км (без соединителей);  $r_c$  – сопротивление рельсовых соединителей на 1 км рельсовой нити. Взаимную индуктивность между двумя рельсами, а также между рельсом и контактным проводом можно определить по известной формуле [3]

$$M_{ij} = 10^{-4} \left[ 1 + 2 \ln \frac{2}{1,78(a-r)\sqrt{4\pi\sigma\omega}} - j \frac{\pi}{2} \right],$$

где  $a$  – расстояние между проводниками;  $r$  – радиус эквивалентного круга с длиной окружности, равной периметру сечения рельса;  $\sigma$  – удельная проводимость земли.

Введем коэффициенты, характеризующие продольную и поперечную асимметрию рельсовой линии:

$$K_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{I_1 - I_2}{2I}, \quad (10)$$

$$K_u = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = \frac{U_1 - U_2}{2U}, \quad (11)$$

$$K_z = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{2Z}, \quad (12)$$

$$K_Y = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} = \frac{Y_1 - Y_2}{2Y}. \quad (13)$$

Преобразуем (1)–(5) с учетом (10)–(13)

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = -\underline{Z}_0 \dot{I} + \underline{Z}_M \dot{I}_3, \quad (14)$$

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = -\underline{Y}_0 \dot{U}, \quad (15)$$

где  $Z_0 = (1 - K_I K_Z) Z$ ,  $Y_0 = (1 + K_U K_Y) Y$ .

Уравнения (14), (15) имеют известные решения

$$U(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}, \quad (16)$$

$$I(x) = -\frac{1}{Z_c} [C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x}] + m I_3, \quad (17)$$

где  $m = \frac{Z_{31}}{Z_1 + Z_{21}}$ .

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  находятся из граничных условий при  $x = 0$  и  $x = L$ .

Для случая, когда сопротивление изоляции балласта соответствует нормативному нижнему пределу 1 Ом/км, что является неблагоприятным для выполнения шунтового режима работы рельсовых цепей, выражения для постоянных интегрирования упрощаются:

$$C_1 = \frac{1}{2}(m-1)Z_c I_3, \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{1}{2}(m-1)Z_c I_3. \quad (19)$$

Продольная и поперечная асимметрия рельсовой линии приводит к появлению тока асимметрии в рельсовых линиях и разности потенциалов между ними. Поскольку для рельсов пути с тягой постоянного тока контактный провод соседнего пути с электротягой переменного тока расположен несимметрично, между рельсовыми линиями появляется переменное напряжение. Таким образом, СТЭ переменного тока приведет к появлению наведенного переменного напряжения на рельсовых цепях соседнего участка с тягой постоянного тока, которое может вызвать опасное или мешающее воздействие на работу рельсовых цепей с сигнальным током автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации частотой 50 Гц.

### Результаты моделирования

По полученным формулам было проведено численное моделирование влияния СТЭ на работу рельсовых цепей своего и соседнего пути.

На рис. 3 приведена зависимость напряжения на рельсовой линии участка пути с тягой постоянного тока от относительной координаты  $x = X/L$  при трех значениях проводимости утечки, равных  $Y_1 = Y_2$  (См/км): 5 (1), 1.0 (2), 1.5 (3), а на рис. 4 – зависимость действующего значения тока в рельсовой линии участка пути с тягой постоянного тока от координаты  $x = X/L$  – при различных действующих значениях переменного тягового тока в контактном проводе другого пути: (0, 50, 100 и 150 А), а также при различных значениях проводимости утечки «рельс-земля» ( $Y_1 = Y_2$  0.5, 1.0 и 5 См/км).

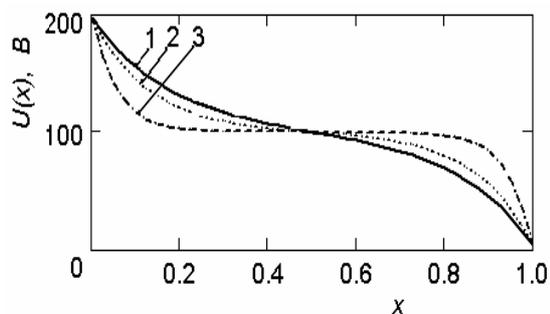


Рис. 3. Зависимость напряжения на рельсовой линии участка пути с тягой постоянного тока от координаты  $x = X/L$  для трех значений проводимости утечки:  $Y_1 = Y_2$  (См/км): 5 (1), (2), 1.5 (3).

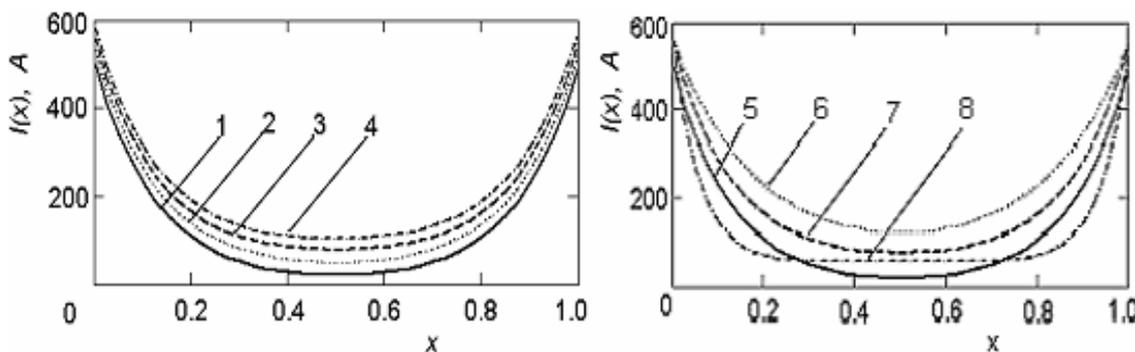


Рис. 4. Зависимость действующего значения тока в рельсовой линии участка пути с тягой постоянного тока от координаты  $x = X/L$ :

(а) – для различных действующих значений переменного тягового тока в контактном проводе соседнего пути: 0 (1), 50 А (2), 100 А (3), 150 А (4); (б) – для различных проводимостей  $Y_1 = Y_2$  (См/км) 5 (5, 6), 1.0 (7), 0.5 (8) при переменном тяговом токе в контактном проводе соседнего пути, равном 0 (5), 100 А (6–8)

Как видно из рис. 4 в рельсовой цепи пути с электротягой постоянного тока, помимо постоянного обратного тока присутствует наведенный переменный ток частотой 50 Гц, причем значения этого тока в двух рельсовых линиях различны, поскольку расстояние рельсовых линий до контактного провода соседнего пути с тягой переменного тока – различно.

Этот ток совпадает по частоте с сигнальным током автоблокировки и током автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) в рельсовых цепях переменного тока частотой 50 Гц или с током АЛС тональных рельсовых цепей и имеет значение, сопоставимое со значениями этих токов.

Наведенный ток может привести к мешающему или опасному влиянию на работу этих рельсовых цепей.

В свою очередь, токи утечки с рельсовой линии с электротягой постоянного тока могут вызвать подмагничивание трансформаторов в рельсовых цепях с электротягой постоянного тока, что также приведет к их нестабильной работе.

## Выводы

Проведенный анализ влияния системы тягового электроснабжения двухпутного участка с различающимися видами электрической тяги на двух соседних путях, выполненный на основе разработанной авторами математической модели, показал, что переменный ток, наводимый в рельсовых цепях пути с электротягой постоянного тока от СТЭ соседнего пути с электротягой переменного тока, имеет значения, сопоставимые по величине со значениями сигнального тока автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации для рельсовых цепей переменного тока частотой 50 Гц или тока АЛС для рельсовых цепей тональной частоты, что может привести к опасному или мешающему влиянию на работу этих рельсовых цепей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирпа Г. Н. Стратегия взаимодействия // *Залізничний транспорт України*. 2003. – № 6. – С. 2–7.

2. Справочник по электроснабжению железных дорог. / Под ред. К. Г. Марквардта. Т. 1. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
3. Брылеев А. М. Электрические рельсовые цепи / А. М. Брылеев, Н. Ф. Котляренко. – М.: Транспорт, – 1970. – 256 с.
4. Аркатов В. А. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. А. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
5. Костроминов А. М. Об электромагнитной совместимости рельсовых цепей с перспективным электроподвижным составом // Автоматика, телемеханика и связь. – 1989. – № 6. – С. 33–34.
6. Костроминов А. М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех. – М.: Транспорт, 1997. – 192 с.
7. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. – Л.-М.: Госэнергоиздат, 1949.

Поступила в редколлегию 20.10.04.