ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ, НАВЕДЕННОГО В ЗАЗЕМЛЕННОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

АГОШТОН, А.—ТАРНАИ, Г.

Институт транспортной техники и организации транспорта
Отдел транспортной автоматики
Будапештского Технического Университета

Представлена проф. д-р Т. КЕЛЕМЕН, профессор
Поступило: в редакцию 28 января 1977 г.

Напряжение в заземлённой контактной сети может появиться путём индуктивной, ёмкостной или гальванической связи. Ниже мы занимаемся исключительно тем случаем, когда напряжение в контуре заземлитель-контактный провод-заземлитель-заземление тяговым током, протекающим по контуру незаземлённый контактный провод пути, параллельного пути с заземлённым контактным проводом — электровоз — заземление (заземлённый рельс и земля). Остальными упомянутыми влияниями мы занимаемся в литературе [6].

Для упрощения при исследовании мы рассматриваем заземлённый на двух концах участок провода контактной сети длиной h, заземлённую рельсовую нить, относящуюся к данному участку, далее два заземлителя как четырёхугольный контур, в котором наводится напряжение u_i под действием которого возникает ток i_i (фиг. 1). Напряжение наводится изменением потока, созданного переменным током, протекающим по цепи контактного провода, электровоза и рельсов соседнего пути. Соответственно этому

$$u_i = M\frac{\mathrm{d}i_v}{\mathrm{d}t}, \tag{1}$$

где M — коэффициент взаимной индукции участка длиной h, i_v — тяговый ток соседней цепи.

Коэффициент взаимной индукции отнесённый к единице длины

$$m = \frac{M}{h} \tag{2}$$

можно считать постоянным, таким образом, наведённое напряжение на единицу длины

$$\frac{u_i}{h} = \frac{M}{h}\frac{\mathrm{d}i_v}{\mathrm{d}t} = m\frac{\mathrm{d}i_v}{\mathrm{d}t}$$

также можно считать постоянным. Навeдённое в контуре напряжение u_i уравновешивается падением напряжения, вызванным током i_i. Если импеданс контура на единицу длины можно было бы считать постоянным (и расстояние электровоза l_v больше длины участка h, т. е. электровоз находится вне участка и так напряжение наводится по всему участку), то наведённое напряжение и падение напряжения уравновешивается не только для всего участка, а также по всем элементарным участкам, т. е. между контактным про-

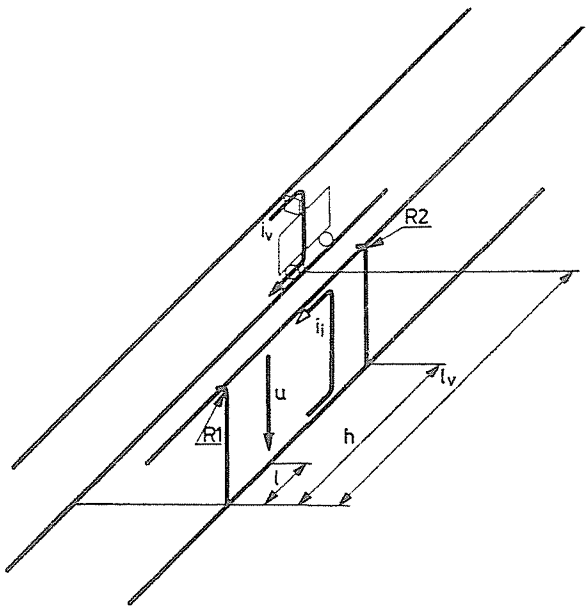

Рис. 1

водом и рельсом никакого напряжения u при любом расстоянии l не возникает (в интервале $0 \leq l \leq h$). При справедливости этого качественного рассуждения может возникать напряжение u, отличающееся от нуля, если наведённое напряжение и падение напряжения не уравновешиваются на каждом элементарном участке. (Полное падение напряжения и полное наведённое напряжение естественно всегда уравновешиваются.) Это наблюдается и в том случае — и практически это так, — если единичный импеданс контактной сети и рельса можно считать постоянными. Отсутствие равновесия внутри элементарных участков может вызываться следующим:

1. Присутствие сосредоточенного импеданса (например, переходное сопротивление заземлителей R_1 и R_2).

2. Возникновение наведённого напряжения не по всей длине, т. е. случай $l_v < h$, (электровоз находится на исследуемом участке).

С учётом вышеупомянутых случаев мы проводим исследование при таких условиях, что *1. случаем* называем появление только одной первой причины, а 2. *случаем* — совместное появление первой и второй причины. При втором случае обозначим *случаем 2а*, когда $l_v \geq l$ и *случаем 2б*, когда $l_v \leq l$ (где l расстояние места исследования напряжения, или длина рассматриваемого участка по фиг. 1). Случаи 2а и 2б превращаются в специальный исходный случай при условии $R_1 = R_2 = 0$, когда имеет место только вторая причина.

Перед отдельным исследованием случаев 1. и 2. сформулируем те соотношения кроме (1) и (2), которые действительны для обоих случаев.

При синусоидальном тяговом токе или при несинусоидальном, но периодическом тяговом токе, для одной гармоники

$$i_v = I_{v\,\max} \sin \omega t = I_v \sqrt{2} \sin \omega t \tag{3}$$

где $I_{v\,max}$ — пиковое значение синусоидального тока, I_v — действующее значение, ω — круговая частота, t — время. По соотношениям (1), (2) и (3) получим

$$u_i = M\, I_v \sqrt{2}\, \omega \cos \omega t \tag{4}$$

Заместив

$$U_i = M\, I_v\, \omega = I_v\, \omega m h \tag{5}$$

получим соотношение

$$u_i = U_i \sqrt{2} \cos \omega t\,, \tag{6}$$

где U_i — действующее значение наведённого напряжения u_i.

Импеданс контактного провода, приходящийся на единицу длины, обозначим через z_f, импеданс рельсовой нити через z_s, наведённый ток в контуре

$$i_i = \frac{u_i}{h(z_f + z_s) + R_1 + R_2}\,, \tag{7}$$

и

$$I_i = \frac{U_i}{h(z_f + z_s) + R_1 + R_2}\,, \tag{8}$$

где I_i — действующее значение наведённого контурного тока.

1. Исследование случая 1.

Неведённое напряжение в контуре стороной l составляет $\frac{l}{h}$-тую часть напряжения, наведённого в полном контуре u_i. При значении импедансов мы принимаем во внимание длину l. Уравнение Кирхгофа принимает вид

$$U + U_i \frac{l}{h} - I_i(z_f l + z_s l + R_1) = 0 \tag{9}$$

где U — действующее значение напряжения u, измеренного между контактным проводом и рельсом на расстоянии l.
Учистывая соотношения (2), (5), (8), (9), а также после сокращений и введения относительных выражений

$$v_h = \frac{l}{h}, \tag{10}$$

$$v_R = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \text{ и} \tag{11}$$

$$v_z = \frac{h(z_f + z_s)}{R_1 + R_2} \tag{12}$$

с помощью алгебраических преобразований, использованием соотношения (2) получим выражение напряжения U:

$$U = I_v \omega m h \frac{v_R - v_h}{v_z + 1} = U_i \frac{v_R - v_h}{v_z + 1} \tag{13}$$

На основе соотношений (12) и (13) качественно можно оценить, что при $R_1 = R_2 = 0$ значение U равно нулю, независимо от практических значений V_R и V_h (они могут принимать значения от нуля до единицы).
Введём обозначение

$$u_e = \frac{U_i}{v_z + 1} \tag{14}$$

соотношение (13) приобретает вид

$$U = u_e (V_R - V_h) \tag{15}$$

Вторая составляющая выражения (15) является действительной, составляющая u_e, как правило, комплексное выражение из-за комплексного V_Z. Используя соотношения (5), (12) и (14) получим выражение

$$u_e = \frac{I_v \omega m h (R_1 + R_2)}{h(z_f + z_s) + R_1 + R_2} \tag{16}$$

в котором z_f и z_s обычно являются комплексными, остальные члены — действительными. В то же время очевидна независимость u_e от l. Комплексное выражение u_e напишем в экспоненциальную форму, выражение (15) имеет вид

$$U = |u_e| (v_R - v_h) \, e^{j \operatorname{arc} u_e} = U_a \, e^{j \operatorname{arc} u_e} \tag{17}$$

в котором $arc\, u_e$ определяет направление вектора комплексного напряжения U по отношению к направлению напряжения U_i, а знак действительного выражения

$$U_a = |\, u_e \,|\, (v_R - v_h) \tag{18}$$

определяет значение (при отрицательном знаке фазовый угол напряжения U составляет $arc\, u_e + 180°$). Величина U_a определяется абсолютным значением вектора напряжения U. Диаграмма, составленная по соотношению (18),

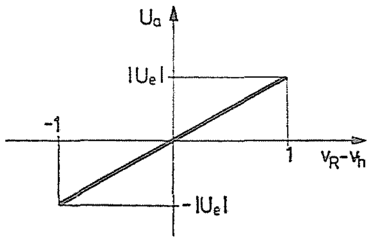

Рис. 2

изображена на фиг. 2. Тангенс направления прямой диаграммы $|u_e|$. Характерные предельные значения на основе соотношения (16):

$$\begin{aligned}
&\lim_{R_1+R_2\to 0} |\, u_e \,| = 0 \\
&\lim_{h\to 0} |\, u_e \,| = 0 \\
&\lim_{h\to\infty} |\, u_e \,| = I_v\omega m(R_1 + R_2)\left|\frac{1}{z_f + z_s}\right| = U_i\,\frac{R_1 + R_2}{h}\left|\frac{1}{z_f + z_s}\right| \\
&\lim_{+R_2\to\infty} |\, u_e \,| = I_v\omega m h = U_i
\end{aligned} \tag{16a}$$

По соотношениям (10), (11) и (18) получим

$$U_a = |\, u_e \,| \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{l}{h}\right) . \tag{19}$$

В случае, когда $R_1 = R_2$ получается диаграмма, изображённая на фиг. 3, по которой максимальное напряжение возникает вблизи заземления, если значение сопротивления заземления отличается от нуля.

В общем случае по соотношению (19) получим диаграмму, изображённую на фиг. 4.

Займёмся в дальнейшем определением неизвестного значения V_Z и V_R, далее R_1 и R_2 при измеренном значении $U = U_1$ и U_{a1}, если $l = 0$, и $U = U_2$ и U_{a2}, если $l = h$. Для этого заменим вышеуказанные значения в выражение

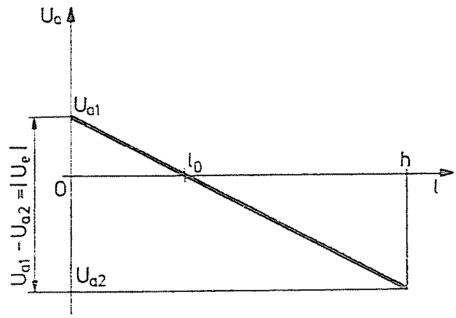

Рис. 3

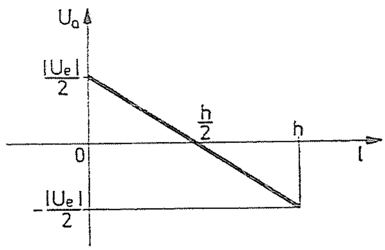

Рис. 4

(10), потом (13). Таким образом получим систему уравнений, состоящую из уравнений

$$U_1 = \frac{U_i}{v_z + 1} \cdot v_R \tag{20}$$

и

$$U_2 = \frac{U_i}{v_z + 1}(v_R - 1) \tag{21}$$

Решая систему уравнений для v_Z и v_R в результате получим

$$v_R = \frac{U_1}{U_1 - U_2} \qquad \text{и} \tag{22}$$

$$v_z = \frac{U_i}{U_1 - U_2} - 1 = \frac{I_v \omega m h}{U_1 - U_2} - 1 \tag{23}$$

(При выводе последней формулы были использованы соотношения (2) и (5).) С учётом того, что к напряжениям U_1 и U_2 принадлежит то же самое u_e, с помощью соотношения (17) и упрощая выражением $e^{j\,\mathrm{arc}\,u_e}$ формула (22) принимает вид:

$$v_R = \frac{U_{a1}}{U_{a1} - U_{a2}} \tag{24}$$

где значение U_{a1} и U_{a2}, подобно значениям по фиг. 4: значение U_a при $l = 0$ и $l = h$. (Знаки U_{a1} и U_{a2} отличаются, в предельном случае одно из напряжений может быть равно нулю.)

Следовательно, значение V_R целесообразно определить с помощью формулы (24) на основе действительных значений U_{a1} и U_{a2}, а значение V_Z — на основе комплексных значений U_1 и U_2 с помощью формулы (23).

Замещая в формулах (22) и (23) соотношения (11) и (12), после преобразования получим выражения

$$R_2 = \frac{h(z_f + z_s)}{\dfrac{I_v \omega m h}{U_1 - U_2} - 1} \cdot \frac{-U_2}{U_1 - U_2} = \frac{h(z_f + z_s)}{\dfrac{I\omega m h}{U_{a1} - U_{a2}} e^{-j \operatorname{arc} u_e} - 1} \cdot \frac{-U_{a2}}{U_{a1} - U_{a2}} \tag{25}$$

$$R_1 = R_2 \frac{U_1}{-U_2} = R_2 \frac{U_{a1}}{-U_{a2}} \tag{26}$$

(Опять использовалось выражение (17).) Заметим, что вторая составляющая формулы (25) является действительной, поэтому первая составляющая тоже должна быть действительной, чтобы значение R_2 получилось действительным. Выражение, выступающее первой составляющей, состоит из данных и результатов измерения (U_{a1}, U_{a2} и $arc\ u_e$). То обстоятельство, что первая составляющая должна быть действительной, позволяет контролировать данные и результаты измерений.

2. Исследование 2. случая

Напряжение, наведённое в полном контуре, возникает только по длине l_v, хотя длина полного участка составляет h, поэтому применяем соотношение

$$U_i' = l_v\, m\, I_v \tag{27}$$

(и не соотношения (2) и (5)).

2.1 *Случай 2a*

В контуре, относящемся к длине l, наведётся напряжение $\frac{l}{l_v} U_i'$ (здесь $l \leq l_v$), таким образом, уравнение Кирхгофа для участка длины l принимает вид

$$U + U_i' \frac{l}{l_v} - I_i'(z_j l + z_s l + R_1) = 0 \tag{28}$$

Введём обозначение

$$v = \frac{l_v}{h} \tag{29}$$

Используя соотношение

$$I_i' = \frac{U_i'}{h(z_f + z_s) + R_1 + R_2} \tag{30}$$

и применяя соотношения (11), (12), (27), (28) и (29) после алгебраических преобразований получим выражение

$$U = I_v \, \omega m \, l_v \frac{v_R - \dfrac{l}{l_v}\left[1 + (1 - v)\, v_z\right]}{v_z + 1} \tag{31}$$

2.2 Случай 2б

В контуре с участком длиной l наводится также напряжение U_i', так как по участку длиной l—l_v, превышающему длину участка l_v (здесь $l \geq l_v$), индукция не возникает, вследствие того, что контур соседнего пути является параллельным с исследуемым контуром (длиной h) только по длине l_v.

Уравнение Кирхгофа имеет вид

$$U + U_i' - I_i'(z_f l + z_s l + R_1) = 0$$

Подставляя соотношения (10), (11), (12), (27), и (30) получим формулу

$$U = I_v \, \omega m \, l_v \frac{v_R[1 + v_z(1 - v_h)]}{v_z + 1} \tag{33}$$

Если мы желаем описать влияние второй причины, упомянутой в введении с помощью формулы и диаграммы, нужно найти предельное значение соотношений (31) и (33) при $R_1 \to 0$ и $R_2 \to 0$. При этом $v_Z \to \infty$, получим
в случае 2а

$$U_0 = \lim_{v_z \to \infty} U = I_v \, \omega m l (v - 1)\,, \tag{34}$$

в случае 2б

$$U_0 = \lim_{v_z \to \infty} U = I_v \, \omega m l_v \,(V_h - 1)\,. \tag{35}$$

Применяя обозначение $\lim\limits_{v_z \to \infty} U = U_0$ в соотношениях (34) и (29) получим уравнение

$$U_0 = I_v \, \omega m l \left(\frac{l_v}{h} - 1\right) \tag{36}$$

сравнивая соотношения (35) и (10), получим формулу

$$U_0 = I_v \, \omega m \, l_v \left(\frac{l}{h} - 1\right) \tag{37}$$

Формула (36) относится к случаю $l \leq l_v$, а формула (37) к случаю $l \geq l_v$. В случае $l = l_v$ по обеим формулам

$$U_0 = I_v \, \omega m \, l_v \left(\frac{l_v}{h} - 1 \right) \qquad (38)$$

На основе соотношений (36) и (37) получим серию кривых, изображённых на фиг. 5., у которых независимая переменная — l_v, параметр — l, зависимая переменная — U_0.

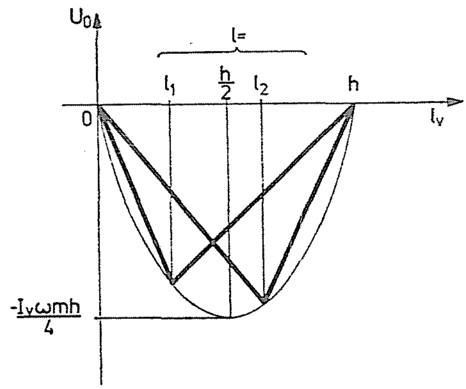

Рис. 5

При значении $l_v = l$ кривые имеют излом (значение параметра равняется значению независимой переменной в этой точке). Возможные значения в точке излома находятся по формуле (38). В системе координат $l_v - U_0$. точки излома образуют параболу, которая по формуле (38) при значений $l_v = 0$ и $l_v = h$ пересекает ось абсциссы и в интервале этих двух значений является отрицательной. Эта парабола также изображена на фиг. 5. Место предельного значения параболы, в то же время и место предельного значения U_0 определяется дифференцированием формулы (38) по l_v. В результате получается, что функция принимает предельное значение при $l_v = \frac{h}{2}$. При этом значение U_0 по формуле (38) развняется — $_vI \, \omega m \; l_v$. 0,5, т. е. — 0,25 $I_v \, \omega m h$.

Вышеизложенные расчёты показали, что при наличии только второй причины максимальное напряжение имеет место тогда, когда электровоз находится на соседнем пути как раз на месте исследования. В этом случае тогда наблюдается максимальное напряжение, если точка исследования выбрана на середине участка, заземлённого на обоих концах. (Возникает напряжение величиной — 0,25 $I_v \, \omega m h = \frac{U_i}{4}$.)

3. Контроль результатов

Результаты могут быть проверены сравнением предельных значений разных соотношений.

Нижеприведённая таблица показывает сравниваемые случаи и применённые ограничения:
в первом случае — $l_v \geq h$
в случае 2а — $l_v \leq h$; $l \leq l_v$
в случае 2б — $l_v \leq h$; $l \geq l_v$

Порядковый номер сравнения	Номер случая / Ограничение	Номер случая / Ограничение
1	2.а.	2.б.
	$R_1 = R_2 = 0$ $l = l_v$	$R_1 = R_2 = 0$ $l = l_v$
2	1.	2.а.
		$l_v = h$
3	1.	2.б.
		$l = l_v = h$
4	2.б.	2.б.
	$l = h/2$ $R_1 = R_2 = 0$	$l = h/2$ $R_1 = R_2 = 0$
5	2.а.	2.б.
	$l = l_v$	$l = l_v$

Сравнение 1

Это сравнение уже сделано. Соотношение (36) и (37) относится к случаям 2а и 2б, при ограничении $R_1 = R_2 = 0$. Оба соотношения привели к формуле (38) при ограничении $l = l_v$.

Сравнение 2

Заменяя в выражении (31) l_v значением h, с помощью соотношения (29) получается соотношение (13).

Сравнение 3

В выражении (33) вместо l_v и l заменим h, с помощью соотношения (10) получим формулу

$$U = I_v\, \omega m h \frac{v_R - 1}{v_r + 1}. \tag{39}$$

Такой же вид имеет соотношение (13) при $l = h$.

Сравнение 4

В выражении (33) заменим соотношения (10) и (11), далее данные $l = h/2$ и $R_1 = R_2$. Приходим к выражению

$$U = 0{,}5\; I_v\, \omega m\, l_v \tag{40}$$

Такой же результат получим, если в выражении (35) заменим $v_h = 0{,}5$ с учётом соотношения (10).

Сравнение 5

Это сравнение подобно сравнению I, отличие заключается в том, что не принимается во внимание ограничение $R_1 = R_2 = 0$.

По соотношениям (10) и (29) в случае $l = l_v$ имеем равенство

$$v = v_h \tag{41}$$

С учётом этого равенства, выражение (31) можно преобразовать и оно примет вид выражения (33).

Каждое контрольное сравнение принесло ожидаемый результат.

4. Определение коэффициента взаимной индукции

В первом случае действительны соотношения (13), (16) и (16а) и косвенно соотношения (15) и (18), далее фиг. 2, 3, 4; в случае 2а действительны соотношения (31) и (34), в случае 2б действительны соотношения (33) и (35) и фиг. 5, действительная в общем случае 2, содержит коэффициент m, т. е. коэффициент взаимной индукции, приходящийся на единицу длины (см. соотношение (2)). Определим теоретическим путём приблизительное значение этого коэффициента с помощью схемы, показанной на фиг. 6. (Контактные провода находятся на высоте B, на расстояние s друг от друга.)

Во-первых, определим силу магнитного поля и его составляющую, перпендикулярную плоскости контура в некоторой точке P, находящейся в плоскости контура, состоящего из участка контактного провода, заземлённого на двух концах. Сила магнитного поля создаётся i_v и $-i_v$ током, протекающим отчасти по соседнему контактному проводу, отчасти по приведённому «заземлённому» проводу, заменяющему соседние рельсы. Абсолютное значение напряжённости $\overline{H}_1$, созданной током в контактном проводе, в силу закона возбуждения:

$$H_1 = \frac{i_v}{2\pi r_1} \tag{42}$$

Абсолютное значение напряжённости $\overline{H}_2$, созданной током «заземлённого провода» составляет

$$H_2 = \frac{i_v}{2\pi r_2} \tag{43}$$

Заметим, что приблизительный характер наших расчётов вызван двумя факторами. Одним из факторов является то, что «заземлённый провод» рассматривается, как один сосредоточенный провод, а в действительности же ток про-

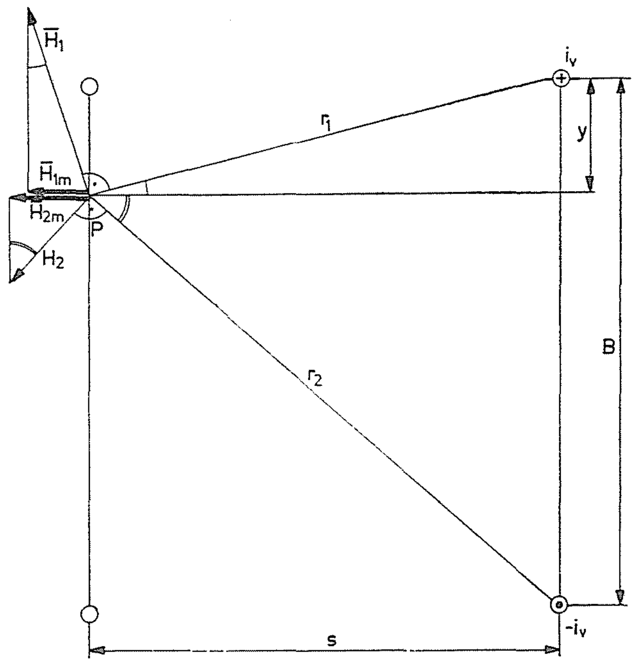

Рис. 6

текает по двум рельсам и по земле. (В зависимости от применённой рельсовой цепи нужно было бы принимать во внимание или два рельса, или по участкам по-переменно по одному рельсу.) Другим фактором является пренебрежение размерами самих проводов по сравнению с расстояниями B и s.

Векторная сумма напряжённостей $\overline{H}_1$ и $\overline{H}_2$ даст результирующую напряжённость в точке P. Для расчёта составляющей $\overline{H}_m$, перпендикулярной к плоскости контура, определим перпендикулярные составляющие напряжённостей $\overline{H}_1$ и $\overline{H}_2$ и сложим их алгебраически. Абсолютное значение перпендикулярных составляющих $\overline{H}_{1m}$ и $\overline{H}_{2m}$ можно выразить с помощью подоб-

$$H_{1m} = H_1 \frac{y}{r_1} \tag{44}$$

и

$$H_{2m} = H_2 \frac{B - y}{r_2} \tag{45}$$

ных треугольников в виде: Соотношения (44) и (45) можно представить в другой форме, используя соотношения (42) и (43), также закон Пифагора для треугольников с гипотенузой r_1 и r_2

$$H_{1m} = \frac{i_v}{2\pi} \frac{y}{s^2 + y^2} \tag{46}$$

и

$$H_{2m} = \frac{i_v}{2\pi} \frac{B - y}{s^2 + (B - y)^2} \tag{47}$$

Сумма перпендикулярных составляющих ($\overline{H}_{1m}$ и $\overline{H}_{2m}$) двух напряжённостей ($\overline{H}_1$ и $\overline{H}_2$) является составляющей $\overline{H}_m$ перпендикулярной плоскости вектора суммарной напряжённости ($\overline{H}_1$ и $\overline{H}_2$). Абсолютное значение этой составляющей

$$H_m = H_{1m} + H_{2m} = \frac{i_v}{2\pi}\left[\frac{y}{s^2 + y^2} + \frac{B - y}{s^2 + (B - y)^2}\right] \tag{48}$$

Плоскость рамки длиной h является перпендикулярной к плоскости рисунка. Внутри элементарной площади $h \,.\, dy$ значение H_m является постоянным. Элементарный поток элементарной площади:

$$d\psi_h = \mu\, H_m\, h\, dy\,, \tag{49}$$

где μ — восприимчивость воздуха. Полный поток

$$\psi_h = \int_0^B \mu\, h\, H_m\; dy\,, \tag{50}$$

т. е. использованием соотношения (48) и после преобразований получим

$$\psi_h = i_v \frac{\mu h}{2\pi} \int_0^B \left[\frac{y}{s^2 + y^2} + \frac{B - y}{s^2 + (B - y)^2}\right] dy\,. \tag{51}$$

С учётом соотношений, справедливых для коэффициента взаимной индукции

$$M = \frac{\psi_h}{i_v} \tag{52}$$

далее (51) и (2), после решения определённого интеграла получим формулы

$$M = \frac{\mu h}{2\pi} \ln\left[1 + \left(\frac{B}{s}\right)^2\right]\,, \tag{53}$$

$$m = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left[1 + \left(\frac{B}{s}\right)^2\right]\,. \tag{54}$$

Напряжение U, измеренное между заземлёнными контактным проводом и «заземлением», определяется при первой причине по соотношению (13), а при второй причине — по соотношениям (34) и (35). В соотношении (13) выступает составляющая $U_i = I_v \omega m h$, которую надо умножить на составляющую по абсолютному значению не больше единицы, а в соотношениях (34) и (35) составляющие $I_v\omega ml \leq U_i$ и $I_v\omega ml_v \leq U_i$ должны быть умножены на составляющую по абсолютному значению также не больше единицы. Таким образом, значение U не может превышать значения $U_i = I_v\omega mh$. Это физически очевидно, так как единственное активное напряжение по рамке — это наведённое напряжение U_i. (На фиг. 5. показано напряжение — 0,25 U_i, как предельное значение. На фиг. 2., 3. и 4. указаны отрезки $|u_e|$ и 0,5 $|u_e|$. Значение $|u_e|$ можно получить в силу соотношения (16) путём умножения составляющей, меньше единицы.)

Напряжение U_i можно рассматривать, как предельное значение и напряжения помехи, вызванные индукцией, не превышают этого значения.

Рассчитаем удельное значение $U_i/h \,.\, I_v = U_{if}$ на основе практических данных ($\omega = 314$/сек, $B = 6$м, $s = 4$ м, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ в сек/а м). Используем формулу, полученную по выражениям (2) и (54)

$$U_{if} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left[1 + \left(\frac{B}{s}\right)^2\right] . \tag{55}$$

После подстановки практических данных в формулу (55), получим значение $U_{if} = 74$ мв/а км.

Если расстояние заземлителей составляет 100 метров, под действием электровоза, потребляющего 100 ампер наводится напряжение всего

$$U_i = 0{,}74 \text{ вольт}$$

Резюме

Напряжение в заземлённой контактной сети может появиться путём индуктивной, ёмкостной или гальванической связи. Мы занимаемся исключительно тем случаем, когда напряжение в контуре заземлитель-контактный провод-заземлитель-заземление тяговым током, протекающим по контуру незаземлённый контактный провод пути, параллельного пути с заземлённым контактным проводом — электровоз — заземление (заземлённый рельс и земля).

Литература

1. Geszti, P. O.: Villamosművek. Tankönyvkiadó, Budapest 1967.
2. CCIF Távközlő vonalak védelme erősáramú vezetékek hatása ellen. Közlekedési Kiadó, Budapest 1954.
3. Брылеев, А. М.—Шишляков, Ю. А.: Устройство и работа рельсовых цепей. Издательство Транспорт, Москва, 1966 г.
4. Árvai, L.—Kuczorai, I.—Tóthfalusi, J.: Korszerű sínáramkörök I. Tankönyvkiadó. Budapest 1966.
5. Tóth, K.: A villamos vontatás helyhezkötött berendezései. Tankönyvkiadó, Budapest 1963.
6. Ágoston, A.—Tarnai, G.: Elektrotechnika **70**, 222 (1977).

д-р Аттила Агоштон
д-р Геза Тарнаи
H-1092. Budapest, Kinizsi u. 1—7.