

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Складывающиеся в последние годы новые социально-политические условия потребовали разработки новой энергетической политики. Для решения этой актуальной проблемы возникает необходимость и в перевооружении хозяйства электроснабжения электрифицированных железных дорог, создании концепции обновления и технического развития тягового электроснабжения, разработке концептуальных решений по нетрадиционным системам тягового электроснабжения [1].

На железных дорогах мира эксплуатируется ряд различных систем электрической тяги, различающихся родом и частотой тока, а также уровнем напряжения в контактной сети. Наиболее широкое распространение получили две основные конкурирующие традиционные системы – это системы 25 кВ и 2х25 кВ переменного тока частотой 50 Гц и 3 кВ постоянного тока. Остальные системы можно отнести к нетрадиционным системам, которые были созданы на разных этапах электрификации железных дорог в процессе поиска наиболее приемлемых и технически реализуемых систем электрической тяги.

Существующие системы тягового электроснабжения не всегда в состоянии обеспечить провозную способность железных дорог. Следовательно, необходимо искать способы повышения тягово-энергетических возможностей эксплуатируемых систем тягового электроснабжения.

Мировой опыт показывает, что на участках с тяжеловесными и скоростными поездами с достаточно большим электропотреблением применяется исключительно система тягового электроснабжения переменного тока 27,5 кВ, которая имеет очень широкую возможность маневра энергетической эффективностью в зависимости от размеров движения. Так в сравнении с обычной системой электротяги 27,5 кВ система с усиливающими и экранирующими проводами (ЭУП) повышает провозную способность в 1,4 раза, автотрансформаторная система 2х25 кВ – в 1,8 - 1,9 раза. В США, Канаде, ЮАР применяется нетрадиционная система 50 кВ, обеспечивающая при длине межподстанционной зоны 60 км и 10-минутном интервале

весовые нормы поездов до 20 тыс. тонн. Дальнейшее увеличение провозной способности может быть достигнуто повышением уровня напряжения питающего провода выше традиционного напряжения 25 кВ – 35, 65, 94, 110 кВ. Возможность реализации систем с нетрадиционным повышенным напряжением в питающем проводе, а также автотрансформаторной системы 2х50 кВ практически полностью снимает ограничения пропускной способности по условиям электроснабжения.

Известно также, что одним из направлений повышения надёжности и эффективности тяговой сети переменного тока является её усиление, так как недостаточность сечения проводов приводит к увеличению потерь энергии и напряжения и связанное с последним показателем снижение скорости движения поездов. В настоящее время наибольшее распространение получили способы усиления тяговой сети за счет включения усиливающих и экранирующих проводов (ЭУП). Определённый эффект даёт также применение устройств ёмкостной компенсации.

Очередной виток научно-технического прогресса обусловлен бурным развитием силовой электроники и компьютерных технологий. Совершенствование системы электрической тяги и перспективы её развития предопределены необратимым процессом обновления всей системы преобразования энергии, затрачиваемой на перевозочный процесс. Применение преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный ток, тиристорных преобразователей уровня напряжения постоянного тока, создание высокоэкономичных алгоритмов компьютерного управления преобразованием электроэнергии, замена коллекторных двигателей постоянного тока на бесколлекторные асинхронные трехфазного тока составляют основное направление технического перевооружения систем электрической тяги и в настоящее время широко используются в ряде промышленно развитых стран.

Существуют несколько способов повышения энергетической эффективности электрической тяги постоянного тока. Один из них - это усиление системы тягового электроснабжения

постоянного тока 3 кВ с помощью фидера постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ и пунктов питания контактной сети на перегоне 24/3 кВ. При этом на тяговой подстанции устанавливается дополнительная выпрямительная установка 24 кВ. На пункте питания устанавливается преобразовательный модуль 24/3 кВ, состоящий из автономного инвертора и выпрямительного агрегата 3 кВ, а питающая линия прокладывается по опорам контактной сети.

Резко повысить пропускную способность и эффективность электрической тяги постоянного тока позволяет уровень напряжения в тяговой сети постоянного тока 24 кВ. В том числе значительно увеличить расстояние между подстанциями, снизить сечение проводов тяговой сети, уменьшить потери электроэнергии в устройствах электроснабжения, полностью устранить несимметрию питающего напряжения. Всё это и отсутствие индуктивных потерь при постоянном токе может превзойти по эффективности все системы переменного тока.

$$\|U\| = \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} \quad \|I\| = \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

Представим уравнение для комплексной амплитуды потенциала k -го провода

$$U_K = \frac{j}{2\pi \cdot \omega \cdot \epsilon_0} \sum_{i=1}^n N_{ik} \frac{dI_i}{dx} \quad (2)$$

($k=1, 2, \dots, n$)

и уравнение

$$\sum_{i=1}^n B_{ik} \cdot I_i = 0 \quad (3)$$

($k=1, 2, \dots, n$)

где I_i - ток в i -м проводе; ω - круговая частота;

$$B_{KK} = -\xi \cdot N_{KK} + F_{KK} + M_K; \quad (4)$$

$$B_{iK} = -\xi \cdot N_{iK} + F_{iK}$$

$$N_{iK} = \ln \frac{r'_{ik}}{r_{ik}}; \quad (5)$$

$$N_{KK} = \ln \frac{2h_K}{r_K}$$

Новые системы тягового электроснабжения требуют прокладки дополнительных проводов и использования многопроводных линий, поэтому очень важно создать методику расчета распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, что позволит с высокой степенью точности обосновать их электромагнитную совместимость со смежными коммуникациями связи и устройствами железнодорожной автоматики.

В электротехнике общепринято анализировать распространение волн вдоль линии на основе решения телеграфных уравнений. Представляя телеграфные уравнения в матричной форме (речь о них уже шла выше), можно применить специфические матричные методы решения, которые хорошо реализуются на ЭВМ.

Определение телеграфных уравнений в матричной форме выглядит следующим образом.

Обозначим столбцевые матрицы напряжений и токов в проводах

$$r_{ik} = \sqrt{(h_i - h_k)^2 + (b_i - b_k)^2} \quad (6)$$

$$r'_{ik} = \sqrt{(h_i + h_k)^2 + (b_i - b_k)^2}$$

$$F_{ik} = 2 \int_0^\infty \frac{1}{v + \sqrt{v^2 - (k_3^2 - k_0^2)}} e^{-v(h_p + h_{ik})} \times \cos v(b_p - b_{ik}) \cdot dv \quad (7)$$

$\times \cos v(b_p - b_{ik}) \cdot dv$

$k_i = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$ - волновое число;

в матричной форме

$$\|U\| = \frac{j}{2\pi \cdot \omega \cdot \epsilon_0} \|N\| \frac{d}{dx} \|I\| \quad (8)$$

$$\|B\| \|I\| = 0 \quad (9)$$

где $\|N\|$ - квадратная симметричная ($N_{ik} = N_{ki}$) матрица, члены которой определяются формулами (5);

$\|F\|$ - квадратная симметричная матрица, члены которой определяются выражением (7);

$\|M\|$ - диагональная матрица, ее члены определяются формулами

$$M_K = \frac{2\pi}{j\omega\mu_0} Z_{k \text{ внутр}} \quad (10)$$

$$Z_{k \text{ внутр}} = \frac{k_1 \rho_1 J_0(k_1 r_1)}{2\pi \cdot r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (11)$$

J_0 и J_1 - функции Бесселя 1-го рода нулевого и 1-го порядков (индексы «1» при k , ρ и g показывают, что эти величины относятся к первому проводу).

После дифференцирования (8) по X :

$$-\frac{d}{dx}\|U\| = -\frac{\gamma^2}{k_0^2} \cdot \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \|N\| \|I\| \quad (12)$$

Умножив уравнение (9) на величину $\frac{j\omega\mu_0}{2\pi}$ и сложив результат с правой частью (12):

$$-\frac{d}{dx}\|U\| = \|Z\| \|I\| \quad (13)$$

Здесь квадратная симметричная матрица погонных сопротивлений линии:

$$\|Z\| = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} (\|N\| + \|F\| + \|M\|) \quad (14)$$

В этом выражении матрица $\|N\|$ характеризует внешние собственные и взаимные индуктивные сопротивления проводов при идеальной проводимости земли, матрица $\|F\|$ - дополнительные внешние собственные и взаимные сопротивления проводов, возникшие из-за конечной проводимости земли, а матрица $\|M\|$ - собственные внутренние сопротивления проводов.

Из уравнения (8) получим:

$$-\frac{d}{dx}\|I\| = \|Y\| \|U\| \quad (15)$$

Здесь квадратная симметричная матрица погонных проводимостей земли:

$$Y = 2\pi\epsilon_0 j\omega \cdot \|N\|^{-1} \quad (16)$$

где $\|N\|^{-1}$ - матрица, обратная матрице $\|N\|$.

Итак, из уравнений Максвелла получены обычные телеграфные уравнения линии (13) и (15) в матричной форме.

Для решения уравнений (13) и (15), преобразуем их, исключая из них матрицы токов и напряжений:

$$\frac{d^2\|U\|}{dx^2} = \|P\| \|U\|; \quad \frac{d^2\|I\|}{dx^2} = \|P'\| \|I\| \quad (17)$$

Где обозначено:

$$\|P\| = \|Z\| \|Y\|; \quad \|P'\| = \|Y\| \|Z\| \quad (18)$$

Штрих сверху - знак транспозиции матрицы.

Решение уравнения (17) в матричном виде для напряжений на проводах n -проводной линии, написанное по аналогии с решением для двухпроводной линии, имеет вид:

$$\|U\| = e^{-\|T\|X} \|B_1\| + e^{\|T\|X} \|B_2\| = \|U_{nad}\| + \|U_{omp}\| \quad (19)$$

Здесь квадратная недиагональная матрица коэффициентов распространения;

$$\|T\| = (\|Z\| \|Y\|)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

где $e^{-\|T\|X}$, $e^{\|T\|X}$ - экспоненциальные функции от квадратной матрицы $\|T\|X$, которые так же являются квадратными матрицами; $\|B_1\|, \|B_2\|$ - столбцевые матрицы постоянных интегрирования.

Главной трудностью является вычисление функции от матрицы. Для этого предварительно необходимо определить все собственные значения матрицы $\|P\|$, то есть найти все коэффициенты распространения волновых каналов. Однако непосредственная диагонализация этой матрицы связана с серьезными вычислительными трудностями, так как коэффициенты распространения различных волновых каналов мало отличаются по модулю друг от друга. Решение существенно упрощается, если преобразовать матрицу $\|P\|$ так, чтобы при диагонализации получать матрицу не коэффициентов распространения, а малых относительных поправок, учитывающих влияние потерь.

Из уравнений (18), (14) и (16) следует:

$$\|P\| = \gamma_0^2 (\|1\| + \|T\|) \quad (21)$$

где

$$\|T\| = (\|F\| + \|M\|) \|N\|^{-1} \quad (22)$$

$\|1\|$ - диагональная единичная матрица.

Подставляя выражения (21) в уравнение

$$\|\lambda\|^{-1} \|P\| \|\lambda\| = \|\gamma^2\| \quad (23)$$

где $\|\gamma^2\|$ - диагональная матрица собственных значений;

$\|\alpha\|$ - квадратная матрица собственных векторов,

получаем

$$\|\lambda\|^{-1} \|T\| \|\lambda\| = \|\xi\| \quad (24)$$

где диагональная матрица малых относительных поправок, которая определена как матрица собственных значений матрицы $\|T\|$

$$\|\xi\| = \frac{1}{\gamma_0^2} \|\gamma^2\| - \|1\| \quad (25)$$

Диагонализация этой матрицы производилась по алгоритму «COMLR2». Смысл этого алгоритма заключается в следующем. Сначала исходная матрица приводится к верхнетреугольной матрице (форме Хесенберга).

Затем вычисляются собственные значения и собственные векторы произвольной матрицы ($n \times n$).

Из выражения (25) получаем

$$\|\gamma^2\| = \gamma_0^2 (\|\xi\| + \|1\|) \quad (26)$$

где коэффициент распространения линии без потерь:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= jk_0 \\ k_0 &= \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu} = \frac{2\pi}{3} 10^{-8} f \end{aligned} \quad (27)$$

Используя выражение для вычисления функции от матрицы (20), можно записать

$$\|G\| = \|\lambda\| \|\gamma\| \|\lambda\|^{-1} \quad (28)$$

где $\|\gamma\|$ - диагональная матрица, члены которой являются квадратными корнями из членов матрицы $\|\gamma^2\|$.

Квадратная матрица фазных волновых сопротивлений вычисляется по формуле

$$\|Z_0\| = \|G\|^{-1} \|Z\| \quad (29)$$

При $x = l$ и $x = 0$ из уравнений (19) с использованием (29) имеем:

$$\left. \begin{aligned} \|U_K\| &= e^{-\|G\|l} \|B_1\| + e^{\|G\|l} \|B_2\| \\ \|Z_0\| \|I_K\| &= e^{-\|G\|l} \|B_1\| - e^{\|G\|l} \|B_2\| \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} \|U_K\| &= \|B_1\| + \|B_2\| \\ \|Z_0\| \|I_K\| &= \|B_1\| - \|B_2\| \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Определяя матрицы B_1 и B_2 из уравнений (25) и подставляя результаты в (31), после преобразования получаем матричные телеграфные уравнения фазных токов и напряжений в начале и конце симметричного многополюсника, где

$$\begin{aligned} ch\|G\|l &= \|\lambda\| ch\|\gamma\| l \|\lambda\|^{-1} \\ sh\|G\|l &= \|\lambda\| sh\|\gamma\| l \|\lambda\|^{-1} \end{aligned} \quad (32)$$

Связь между напряжениями и токами в начале и конце многопроводной линии (в общем случае $2n+1$ -полюсника) может быть представлена разными типами матричных уравнений, из которых наиболее употребляемыми являются:

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|A_{11}\| \|U_K\| + \|A_{12}\| \|I_K\| \\ \|I_H\| &= \|A_{21}\| \|U_K\| + \|A_{22}\| \|I_K\| \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$\left. \begin{aligned} \|I_H\| &= \|Y_{11}\| \|U_H\| + \|Y_{12}\| \|U_K\| \\ \|I_K\| &= \|Y_{21}\| \|U_H\| + \|Y_{22}\| \|U_K\| \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|Z_{11}\| \|I_H\| + \|Z_{12}\| \|I_K\| \\ \|U_K\| &= \|Z_{21}\| \|I_H\| + \|Z_{22}\| \|I_K\| \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Поскольку все эти уравнения могут описывать один и тот же $2n+1$ -полюсник, между блоками матриц $\|A\|$, $\|Y\|$ и $\|Z\|$ существует линейная зависимость. Так, например, можно записать

$$\left. \begin{aligned} \|Y_{11}\| &= \|A_{22}\| \|A_{12}\|^{-1} \\ \|Y_{12}\| &= \|A_{21}\| - \|A_{22}\| \|A_{12}\|^{-1} \|A_{11}\| \\ \|Y_{21}\| &= \|A_{12}\|^{-1} \\ \|Y_{22}\| &= -\|A_{12}\|^{-1} \|A_{11}\| \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Известно, что цепочечное соединение многополюсников удобнее всего описываются зависимостью типа $\|A\|$, параллельное - зависимостью $\|Y\|$ и последовательное - зависимостью типа $\|Z\|$.

Для однотипного соединения m -полюсников результирующая матрица эквивалентного многополюсника определяется:

$$\|A_{\text{рез}}\| = \prod_{i=1}^m \|A_i\| \quad (37)$$

Для того, чтобы рассчитать величины токов и напряжений полюсов $2n+1$ -полюсника, необходимо задать для него граничные условия. В наиболее общем виде граничные условия на входе и на выходе $2n+1$ -полюсника задаются с помощью полных $n+1$ -полюсников, активных для передающего и пассивных для приемного конца.

Нагрузка представляется в виде матрицы $\|Y_k\|$, которая выглядит следующим образом:

$$Y = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n Y_{1i} & -Y_{12} & \dots & \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{12} & \sum_{i=1}^n Y_{2i} & \dots & \dots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n Y_{ni} \end{pmatrix} \quad (38)$$

где $Y_{Ki} = Y_{iK}$ - проводимость между k -м и i -м полюсами $n+1$ - полюсника.

В общем виде нагрузка задается с помощью элементов R , L и C .

Выражение для матричной входной проводимости запишется

$$\|Y_{BX}\| = (\|A_{21}\| + \|A_{22}\| \|Y_K\|)(\|A_{11}\| + \|A_{12}\| \|Y_K\|)^{-1} \quad (39)$$

Схема полного активного $n+1$ -полюсника отличается от схемы пассивного тем, что его ветви содержат источники э.д.с. или источники тока.

Таким образом, зная входную проводимость линии (39) можно получить напряжение в ее начале

$$\|U_H\| = (\|1\| + \|Z_{\Gamma}\| \|Y_{BX}\|)^{-1} \|E\| \quad (40)$$

и далее можно определить все оставшиеся токи и напряжения в начале и конце линии:

$$\|U_K\| = (\|A_{11}\| + \|A_{12}\| \|Y_K\|)^{-1} \cdot \|U_H\| \quad (41)$$

$$\|I_H\| = (\|A_{21}\| + \|A_{22}\| \|Y_K\|) \cdot \|U_K\| \quad (42)$$

$$\|I_K\| = \|Y_K\| \|U_K\| \quad (43)$$

При заданной схеме транспозиции можно написать следующие равенства

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|N_T\| \|U_K\| \\ \|I_H\| &= \|N_T\| \|I_K\| \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

где $\|N_T\|$ - матрица n -го порядка идеального преобразователя напряжений (токов).

В матрице $\|N_T\|$ элементы, лежащие на пересечении i -й строки и k -го столбца (i - номер провода до транспозиции, k - после транспозиции), равны единице, а остальные равны нулю.

Так как транспозиция не накладывает никакой связи между матрицами напряжений и токов проводов, то матрицы типа A для транспозиции имеют квазидиагональную структуру:

$$\left. \begin{aligned} \|A_{11}\| &= \|N_T\|; & \|A_{12}\| &= 0 \\ \|A_{21}\| &= 0; & \|A_{22}\| &= \|N_T\| \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

В исходные данные вносится расчётная схема замещения.

Так как к линиям продольного электроснабжения 10 кВ подключается большое количество однофазных потребителей, как правило, малой мощности, то на схеме замещения нагрузка может быть задана средними значениями элементов активно-индуктивного характера R_H , L_H и условно приложенная в конце фидерного участка.

Для представления информации об уровнях гармоник используем графическое представление в системе трех координат, что позволяет количественно оценить напряжения гармонических в продольной линии электроснабжения 10кВ во всех точках участка с помощью трехмерной диаграммы, приведенной на рис. 1 и рис. 2. На этих рисунках показаны два крайних случая на конце линии – линия разомкнута и линия коротко замкнута. Разница в значениях гармоник вдоль линии определяется свойствами стоячей волны и сдвигом резонансных частот на конце линии.

На всех шинах имеют место главные резонансы, причем первый происходит между четвертой и пятой гармониками, а второй – между 19-й и 20-й, что соответствует резонансам, отмеченным на подстанции.

Ток прямой последовательности каждой гармоники (до 25 включительно), выраженный в относительных единицах, поступает от подстанции в Фадино. Напряжениям, вызываемым протеканием тока, соответствуют рассчитанные сопротивления, т.е. U_1 дает Z_{11} , U_2 дает Z_{12} , и U_0 дает Z_{10} (индексы 1, 2, 0 обозначают соответственно прямую, обратную и нулевую последовательности).

Из рис. 1 видно, что на обоих концах разомкнутой линии имеются повышенные уровни напряжения на частоте, соответствующей половине длине волны. Кривая, соответствующая 25-й гармонике, наглядно иллюстрирует свойства стоячей волны, когда минимумы и максимумы чередуются с интервалами в четверть длины волны. Для каждой конкретной частоты наличие в точке линии пикового напряжения означает, что в точке, отдаленной на четверть длины волны, существует пик тока той же частоты (рис. 1, б).

Распространение гармоник меняется, если линию замкнуть накоротко на приемном конце (рис. 2).

Из-за короткого замыкания на конце линии возникает большой ток. Резонансный максимум должен уменьшаться с ростом частоты [1], однако такого явления не возникает для случая, изображенного на рис. 2, а. Это связано с тем, что точки кривых, соответствующие гармоническим частотам и резонансам, не точно совпадают с этими частотами.

Распространение составляющих нулевой последовательности в большей степени, чем прямой последовательности, дает необходимую информацию о возможном влиянии гармоник на близлежащие коммуникационные системы.

Присутствие токов нулевой последовательности в линии, соединенной с преобразовательным мостом, вызвано асимметрией либо эле-

ментов преобразователя на стороне переменного тока, либо элементов самой линии.

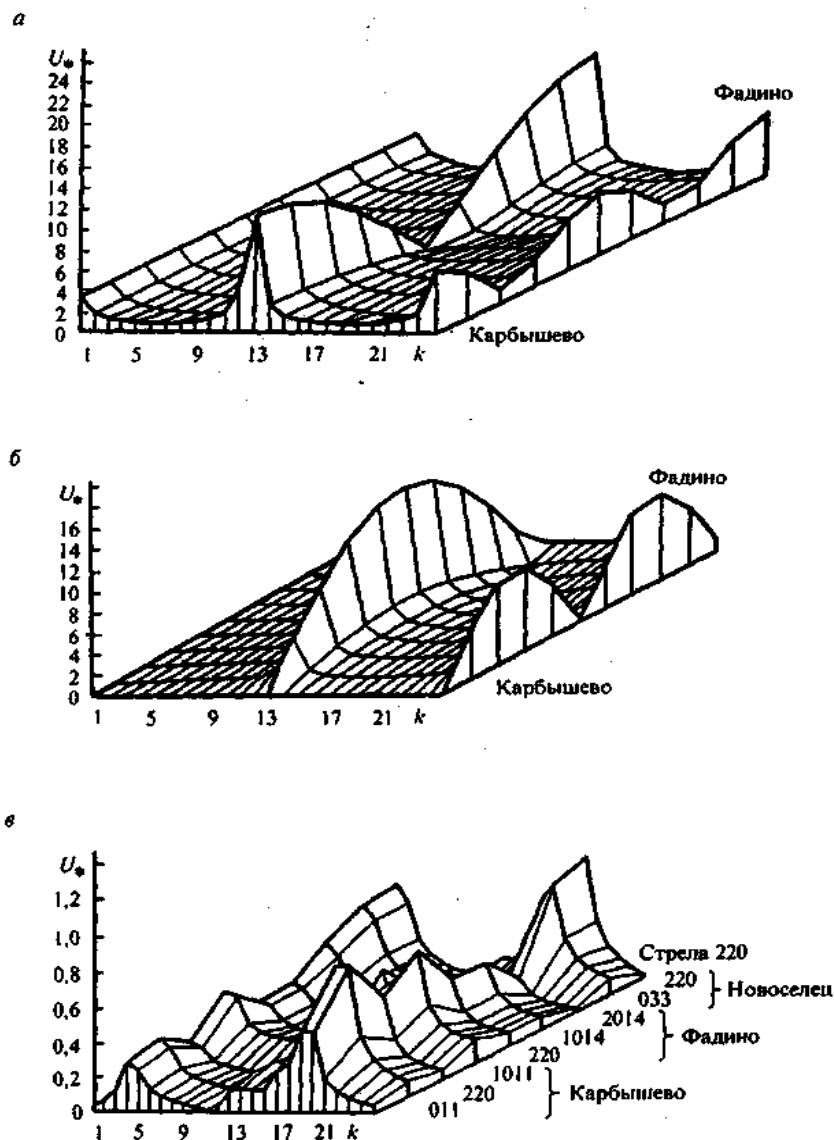


Рис.1. Зависимость напряжения прямой последовательности от частоты: а) вдоль разомкнутой линии; б) вдоль разомкнутой линии при генерации единичного тока прямой последовательности; в) на всех шинах системы

На рис. 2,а положение максимального тока прямой последовательности совпадает с максимумом тока нулевой последовательности (рис. 2, в), а наибольшее значение тока, равное примерно 10 % от входного тока прямой последовательности, было зафиксировано для 19-й гармоники на короткозамкнутом конце линии. Однако уровни токов нулевой последовательности малы (сравните масштабы шкал графиков для прямой и нулевой последовательностей).

В рассматриваемом гармоническом анализе, использующем однофазные модели прямой последовательности [1], считается, что линия электропередачи имеет одну резонансную частоту. Однако использование трехфазного алгоритма для моделирования несимметричной линии показало, что резонансные частоты фаз различаются между собой. В приведенном случае разброс частот составил примерно 6 Гц.

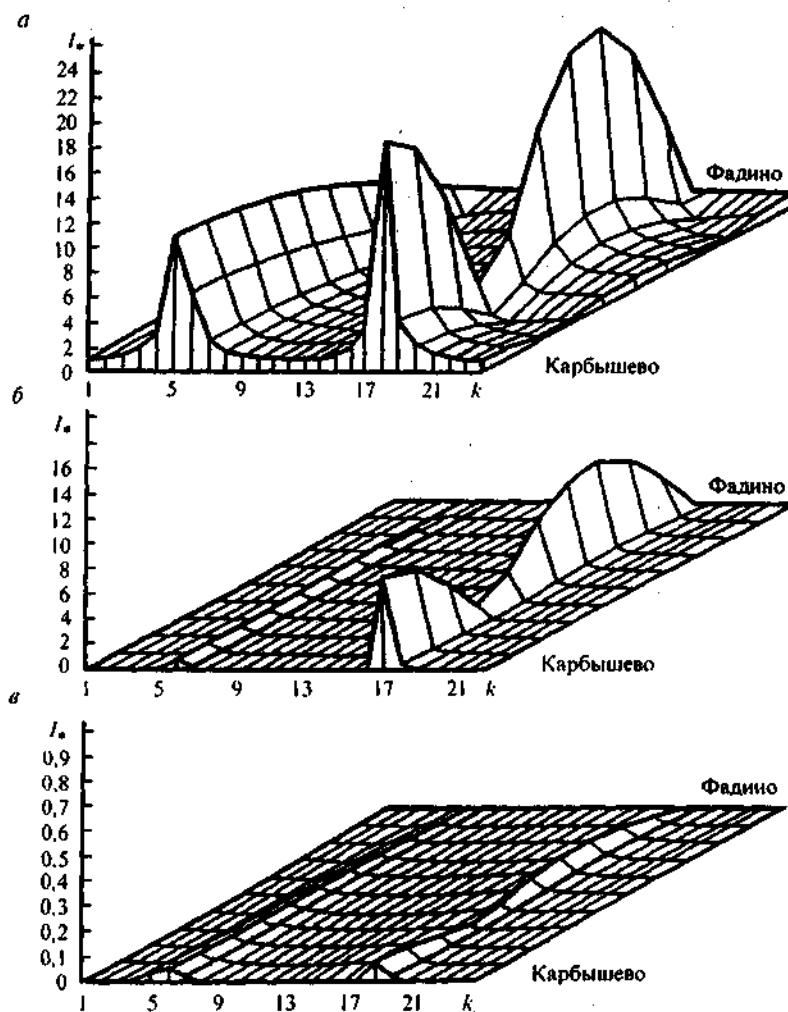


Рис. 2. Токи различных последовательностей вдоль короткозамкнутой линии при генерации единичного тока прямой последовательности: а) ток прямой последовательности; б) ток обратной последовательности; в) ток нулевой последовательности

Различие амплитуд резонансных частот (вплоть до 30 %) трех фаз частично объясняет проявление проблем, связанных с корреляцией однофазного моделирования и измерений в физической сети. Результаты ясно показывают, что гармоники в линиях несимметричны и имеют трехфазную природу.

Нормальная транспозиция линии на трех участках одинаковой длины с целью симметрирования линии на основной частоте может оказать существенное влияние на гармонических частотах. Например, моделирование транспозиции рассматриваемой линии дает результаты, которые показывают, что кривые напряжения имеют два резонансных пика на расстоянии 40 Гц друг от друга для половины длины волны (620 и 625 Гц для фаз С и А соответственно).

Выполненные исследования и проведенный анализ показали возможность моделирования

распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, которые позволяют определять не только токи и напряжения в любой заданной точке многопроводной линии, но и одновременно наведенные напряжения в смежной линии. Всё это позволяет с высокой степенью точности проводить обоснование электромагнитной совместимости тяговой сети и линий продольного электроснабжения с коммуникациями связи и цепями железнодорожной автоматики.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Бадер. Электромагнитная совместимость. Учебник для вузов. М.: Транспорт, 2002. – 640 с.