

БАДЕР М. П. – д.т.н., профессор (Московский государственный университет путей сообщения)

## **АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

В последние годы идет активное развитие и внедрение перспективных видов электроподвижного состава (ЭПС) с асинхронными тяговыми двигателями (АТД). Для применения асинхронных двигателей необходимо обеспечить преобразование однофазного тока, подводимого по тяговой сети к электровазам, в трехфазный ток, что достигается с помощью тиристорно-импульсных преобразователей, в частности автономного инвертора напряжения (АИН). Анализ применяемых в настоящее время структурных схем электроподвижного состава постоянного тока на Российских и зарубежных железных дорогах показывает, что наиболее часто применяется ЭПС с АТД и непосредственным подключением АИН к тяговой сети через фильтры, снижающие до допустимых значений электромагнитное воздействие переменных составляющих тяговых токов на устройства связи и железнодорожной автоматики. Последние, в том числе автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС) и сигнализация, централизация и блокировка (СЦБ) призваны обеспечить безопасность движения поездов, поэтому проблема электромагнитной совместимости их с перспективной системой электрической тяги приобретает первостепенное, остро актуальное значение, особенно при условии сохранения высоких энергетических и жестко ограниченных массогабаритных показателей преобразовательного оборудования и фильтров ЭПС. Для определения электромагнитной совместимости выше указанных технических средств тягового электропитания необходимо математическое описание электромагнитных процессов, происходящих в выпрямительно-инверторных преобразователях тяговых подстанций и преобразователях постоянно-переменного тока ЭПС, которое позволяет реализовать математиче-

скую модель и провести гармонический анализ тока в любой цепи преобразователей, на входе ЭПС и в тяговой сети.

Целью работы является анализ и синтез электромагнитной совместимости тягового электропитания, систем управления и телекоммуникаций. В основу исследований положены кусочно-линейный метод, основанный на численном интегрировании дифференциальных уравнений [1], и спектральный метод, основанный на использовании преобразования Фурье. Связь между мгновенными значениями входных и выходных величин полупроводникового коммутатора выражаться с помощью коммутационных функций, позволяющих заменить, преобразовательные вентиляльные цепи эквивалентными цепями без вентилялей. В схемах вентиляльных преобразователей, содержащих один вентиляльный коммутатор предполагается заранее известная конфигурация электрической цепи, а, следовательно, и значения коммутационной функции. Автономные инверторы при условии непрерывности токов относятся к тому классу преобразовательных устройств, у которых состояние вентилялей однозначно определяется алгоритмом их управления, что позволяет практически без существенных допущений использовать спектральные методы для анализа электромагнитных процессов.

Несмотря на то, что в АИН возможно большое разнообразие методов и способов импульсной модуляции, следует заметить, что входные токи и напряжения во всех случаях могут быть представлены в виде суммы гармонических составляющих с частотами, кратными частоте основной гармоники и комбинационными частотами. Получены выражения для коммутационных функций, которые охватывают практически

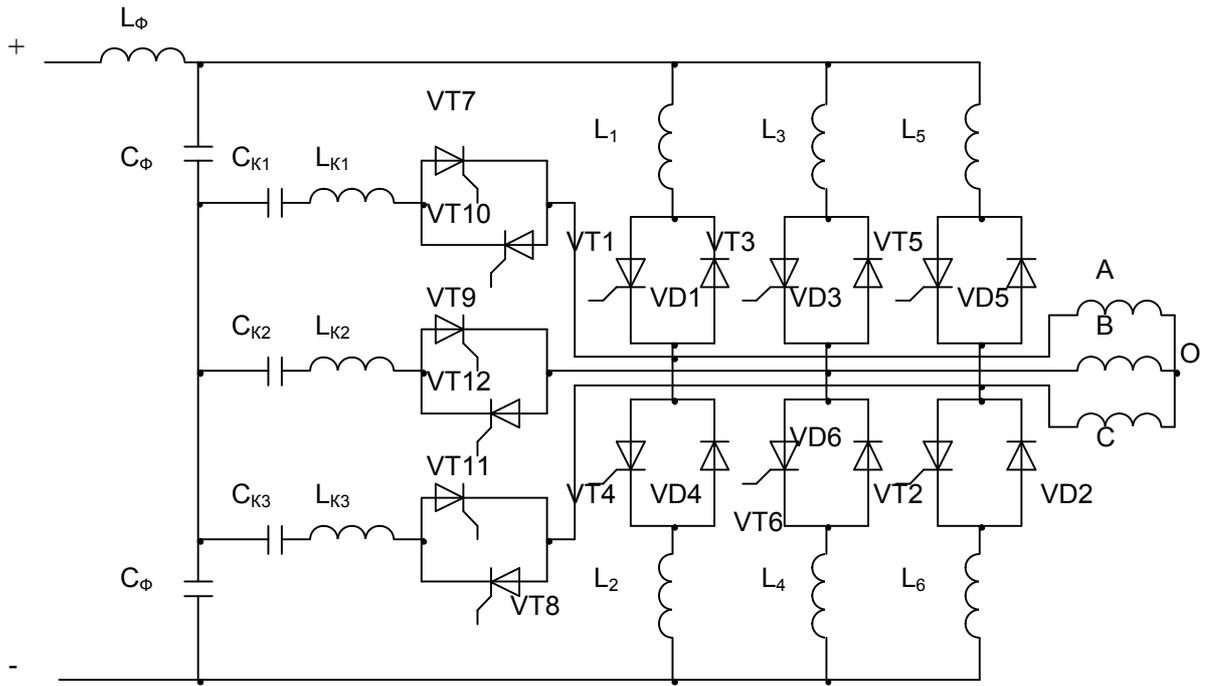


Рис. 1. Принципиальная схема АИН

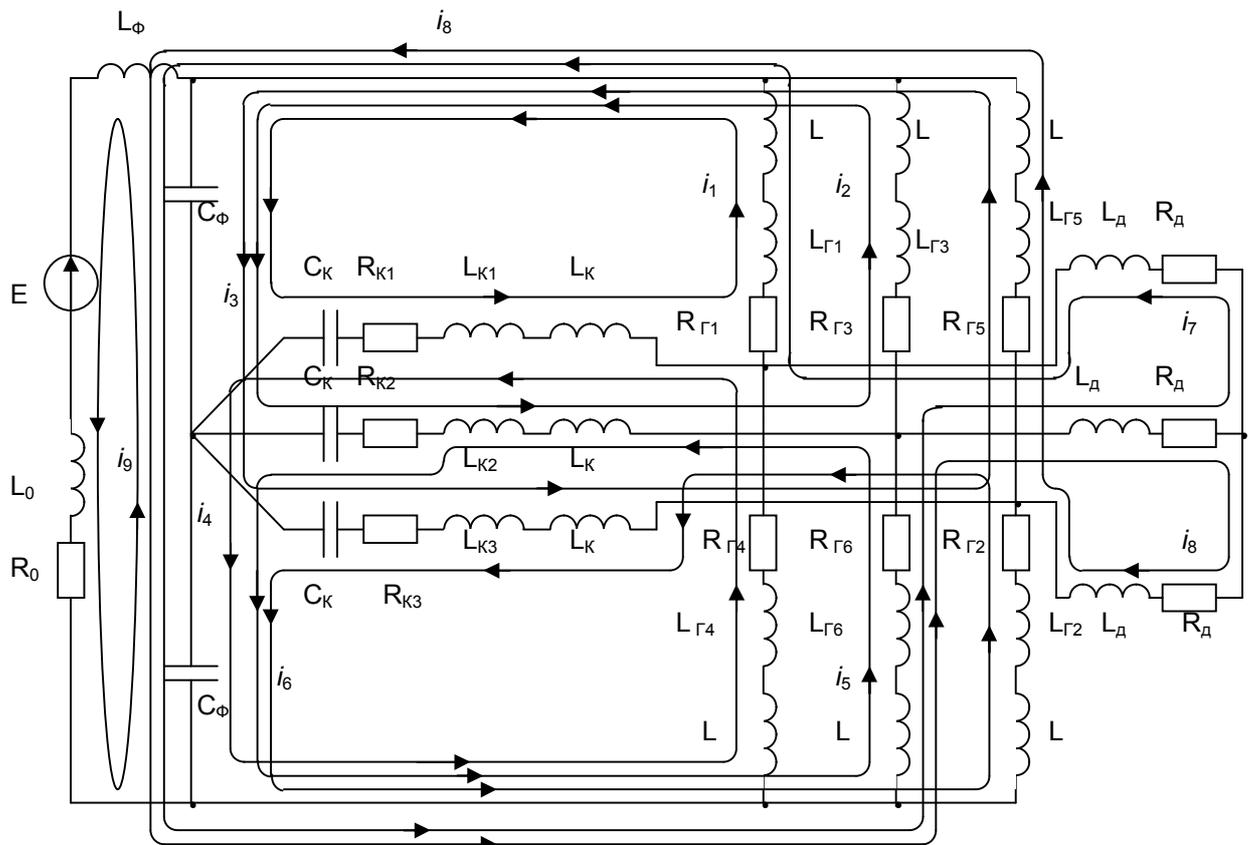


Рис. 2. Схема замещения АИН

все типы полупроводниковых преобразователей и позволяют производить расчеты гармонических составляющих токов и напряжений в силовых цепях преобразователей тяговых подстанций и электроподвижного состава постоянного тока и тем самым определять уровни гармоник тока генерируемых в тяговую сеть.

Для математического моделирования идеальные вентили АИН замещаются последовательным соединением активного и индуктивного сопротивления. На рис. 2 приведена расчетная схема замещения АИН. При этом, сопротивлениям, замещающим проводящие вентили, придается значение намного меньше [2], а замещающим непроводящие вентили – намного больше, чем сопротивления остальных элементов

схемы, что различие в режимах схем с идеальными вентилями и вентилями замещенными конечными сопротивлениями, может быть сделано достаточно малым. Тогда схема преобразователя может быть описана системой дифференциальных уравнений, включающих значения этих сопротивлений как параметры. Полученная система дифференциальных уравнений численно интегрируется на ЭВМ, и в момент времени, когда создаются условия для открытия или записания вентилей, замещающие их сопротивления изменяются по величине, что вызывает изменение коэффициентов системы, но не ее структуры.

Для этой схемы система дифференциальных уравнений в контурных токах имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_1 dt + (L_{\kappa 1} + L_{\Gamma 1} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_1}{dt} + (R_{\Gamma 1} + R_{\kappa 1}) \cdot i_1 + R_{\Gamma 1} \cdot i_7 + (L_{\Gamma 1} + L) \cdot \frac{di_7}{dt} - \\ & - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_4 dt - (L_{\kappa 1} + L_\kappa) \cdot \frac{di_4}{dt} - R_{\kappa 1} \cdot i_4 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_2 + i_3 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\ & \left( \frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_2 dt + (L_{\kappa 3} + L_{\Gamma 3} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_2}{dt} + (R_{\Gamma 3} + R_{\kappa 3}) \cdot i_2 - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_5 dt - (L_{\kappa 3} + L_\kappa) \cdot \frac{di_5}{dt} - \\ & - R_{\kappa 3} \cdot i_5 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_1 + i_3 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\ & \left( \frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_3 dt + (L_{\kappa 2} + L_{\Gamma 5} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_3}{dt} + (R_{\Gamma 5} + R_{\kappa 2}) \cdot i_3 + R_{\Gamma 5} \cdot i_8 + (L_{\Gamma 5} + L) \cdot \frac{di_8}{dt} - \\ & - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_6 dt - (L_{\kappa 2} + L_\kappa) \cdot \frac{di_6}{dt} - R_{\kappa 2} \cdot i_6 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_1 + i_2 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\ & \left( \frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_4 dt + (L_{\kappa 1} + L_{\Gamma 4} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_4}{dt} + (R_{\Gamma 4} + R_{\kappa 1}) \cdot i_4 - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_1 dt - (L_{\kappa 1} + L_\kappa) \cdot \frac{di_1}{dt} - \\ & - R_{\kappa 1} \cdot i_1 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_5 + i_6 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\ & \left( \frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_5 dt + (L_{\kappa 3} + L_{\Gamma 6} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_5}{dt} + (R_{\Gamma 6} + R_{\kappa 3}) \cdot i_5 + R_{\Gamma 6} \cdot i_7 + (L_{\Gamma 6} + L) \cdot \frac{di_7}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_8 + \\ & + (L_{\Gamma 6} + L) \cdot \frac{di_8}{dt} - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_2 dt - (L_{\kappa 3} + L_\kappa) \cdot \frac{di_2}{dt} - R_{\kappa 3} \cdot i_2 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_4 + i_6 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa}\right) \cdot \int_0^t i_6 dt + (L_{\kappa 2} + L_{\Gamma 2} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_6}{dt} + (R_{\Gamma 2} + R_{\kappa 2}) \cdot i_6 - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_3 dt - (L_{\kappa 2} + L_\kappa) \cdot \frac{di_3}{dt} - R_{\kappa 2} \cdot i_3 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_4 + i_5 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0$$

$$\frac{2}{C_\phi} \int_0^t (i_7 + i_8 - i_9) dt + \frac{1}{C_\phi} \int_0^t (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6) dt + (L_{\Gamma 1} + L_{\Gamma 6} + 2L + 2L_\delta) \frac{di_7}{dt} + 2R_\delta \cdot i_7 + R_\delta \cdot i_8 + (L_{\Gamma 6} + L + L_\delta) \frac{di_8}{dt} + (R_{\Gamma 1} + R_{\Gamma 6}) \cdot i_7 + R_{\Gamma 1} \cdot i_1 + (L_{\Gamma 1} + L) \frac{di_1}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_5 + (L_{\Gamma 6} + L) \frac{di_5}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_8 = 0$$

$$\frac{2}{C_\phi} \int_0^t (i_7 + i_8 - i_9) dt + \frac{1}{C_\phi} \int_0^t (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6) dt + (L_{\Gamma 5} + L_{\Gamma 6} + 2L + 2L_\delta) \frac{di_8}{dt} + 2R_\delta \cdot i_8 + R_\delta \cdot i_7 + (L_{\Gamma 6} + L + L_\delta) \frac{di_7}{dt} + (R_{\Gamma 5} + R_{\Gamma 6}) \cdot i_8 + R_{\Gamma 5} \cdot i_3 + (L_{\Gamma 5} + L) \frac{di_3}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_5 + (L_{\Gamma 6} + L) \frac{di_5}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_7 = 0$$

$$\frac{2}{C_\phi} \int_0^t (i_9 - i_8 - i_7) dt + \frac{1}{C_\phi} \int_0^t (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6) dt + L_0 \frac{di_9}{dt} + R_0 \cdot i_9 = E$$

где  $i_1 - i_9$  – контурные токи;

$R_{\Gamma 1} - R_{\Gamma 6}$ ,  $L_{\Gamma 1} - L_{\Gamma 6}$  – соответственно активные сопротивления и индуктивности замещения силовых вентилях (главных тиристоров VT1-VT6 и шунтирующих их обратных диодов VD1-VD6), Ом и Гн;

$R_{\kappa 1} - R_{\kappa 3}$ ,  $L_{\kappa 1} - L_{\kappa 3}$  – соответственно активные сопротивления и индуктивности коммутационных вентилях (VT7-VT12), Ом и Гн;

$L$ ,  $L_\phi$  – индуктивности анодных, катодных дросселей и фильтра, Гн;

$C_\kappa$ ,  $C_\phi$  – емкости коммутирующих конденсаторов и фильтра, Ф;

$E$  – напряжение источника питания, В;

$R_\delta$ ,  $L_\delta$  – соответственно активная и индуктивная составляющая внутреннего сопротивления источника питания, Ом и Гн;

$R_\delta$ ,  $L_\delta$  – соответственно активная и индуктивная составляющая сопротивления одной фазы асинхронного тягового двигателя, Ом и Гн.

Для численного решения данной системы дифференциальных уравнений исключаем интегралы в этих уравнениях вводя новые переменные  $Q_i = \int_0^t i_i dt$ . Затем, эту систему дифференциальных уравнений реша-

ем относительно первых производных, рассматривая производные как искомые величины и обращаясь с остальными как с заданными. Реализация данной математической модели позволяет определить контурные токи, токи в плечах главных тиристоров, коммутационные токи, токи каждой фазы асинхронного тягового двигателя, ток на входе АИН и ток тяговой сети.

Использование преобразования Фурье позволяет получить гармонический состав тока в любой ветви АИН. Характеристики источников помех могут быть получены с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) на математической модели. Моделирование выполнено в системе анализа и проектирования электронных устройств ORCAD 9.2. Расчеты при разработке отдельных методик выполнены с помощью стандартных математических программ Matcad и Table curve.

Для определения гармонических составляющих входного тока может быть использована так же полная система уравнений привода АИН с ШИМ. Аналогично может быть выполнен гармонический анализ токов и напряжений на входе и выходе инверторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций. При наличии значитель-

ной несимметрии и несинусоидальности напряжения на входе тяговых подстанций, превышающей допустимые показатели качества электрической энергии согласно ГОСТ-1310997, гармонический анализ токов и напряжений в выпрямительно-инверторных агрегатах подстанций следует проводить с учетом несимметричных режимов.

Выпрямленное напряжение тяговой подстанции, а, следовательно, и ток тяговой сети содержит ряд гармонических колебаний с частотами кратными частоте трехфазной сети [3], которые совместно с гармониками, обусловленными пульсациями тока АИН ЭПС создают дополнительные комбинационные гармоники тока и напряжения. Колебания в тяговой сети приводят к резонансам токов на некоторых частотах, что требует их подробного исследования.

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

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

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

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

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

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:

$$\|A_{\text{рез}}\| = \prod_{i=1}^m \|A_i\|.$$

## Выводы

Разработанные методики и программы позволяют исследовать электромагнитные процессы в выпрямительно-инверторных агрегатах тяговых подстанций, автономном инверторе напряжения асинхронного тягового привода, определять и прогнозировать уровни гармонических составляющих тока как в самих преобразователях постоянно-переменного тока, так и тока в тяговой сети. Это дает возможность с высокой степенью точности определять электромагнитное воздействие различных силовых полупроводниковых преобразователей на устройства связи и железнодорожной автоматики и обосновывать выбор схем и параметров защит, обеспечивающих электромагнитную совместимость.

## Библиографический список

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – М: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог - 4-е изд., перераб. и дополн [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. К. Г. Марквардт. - М.: Транспорт, 1982. - 528 с.
3. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения [Текст] / М. В. Костенко, Л. С. Перельман, Ю. П. Шкарин – М.: Энергия, 1973. – 272с.
4. Марквардт, К. Г. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст]: в 2 т. / Ю. Н. Макас, В. М. Эрлих, П. М. Шилкин, Б. Е. Геронимус, И. Б. Мостинский и др.; Под ред. К. Г. Марквардта. - М.: Транспорт, 1980-1981. – 238 с.
5. 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.

**Ключові слова:** математичний опис, тягова мережа, автономний інвертор напруги, асинхронний тяговий привід, гармонійні складові перетворювача.

**Ключевые слова:** математическое описание, тяговая сеть, автономный инвертор напряжения, асинхронный тяговый привод,

гармонические составляющие преобразователя.

**Key words:** mathematical description, traction network, voltage autonomous inverter, asynchronous propulsion drive, harmonic components of converter.

Поступила в редколлегию 24.11.2010.

Принята к печати 26.11.2010.

УДК 621.331 : 621.332

ЗАВГОРОДНИЙ А. В. – главный инженер (Приднепровская железная дорога)

ГАВРИЛЮК В. И. – д.ф.-м.н., профессор (ДНУЖТ)

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИМПЕДАНСА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

### Постановка задачи

При проектировании систем сигнализации, связи, тягового электроснабжения на электрифицированных железных дорогах необходимы численные значения импеданса рельсовых линий, линий контактной сети, продольного электроснабжения, проводной связи, а также других линий, расположенных на опорах контактной сети или на отдельно стоящих опорах вблизи железнодорожного пути. Сведения о частотной зависимости собственной и взаимной индуктивности таких линий необходимы также для обеспечения их электромагнитной совместимости.

Целью работы является анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог. Импеданс электрических линий зависит от их взаимного расположения, расстояния до земли, а также проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемости земли.

Выражения для расчета импеданса проводников, расположенных над поверхностью земли, получены впервые Карсоном [1]

и, независимо от него, Полачеком [2] при следующих предположениях:

- земля однородна;
- диэлектрическая и магнитная проницаемости земли и воздуха одинаковы;
- токи смещения в земле пренебрежимо малы;
- параллельный адмитанс между проводниками и землей не влияет на проводимость земли.

Решение получено для квази-ТЕМ мод электромагнитного поля (т.е. в предположении, что электромагнитное поле имеет только продольные моды). Импеданс проводников выражен через несобственные интегралы, для приближенного вычисления которых предложены формулы, аппроксимирующие интегралы в виде бесконечных рядов.

В [3,4] задача решена в более общем виде, что позволило снять ограничения, связанные с предположением о равенстве диэлектрических и магнитных проницаемостей земли и воздуха. В [5] обобщены результаты предшествующих работ и предложена общая формула, известна как формула