

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Введение

Передачу электроэнергии по однопроводной линии впервые предложил и осуществил Никола Тесла. В 1893 г. он показал, что нет необходимости использовать два проводника для передачи электрической энергии и практически была обоснована передача энергии через одиночный проводник без возврата [1]. Его система включала источник мощных импульсов, который подключался к первичной обмотке трансформатора Теслы. Высоковольтный выход трансформатора через одиночный провод соединялся с входом приемного трансформатора. Эта идея лежит и в основе принципа работы резонансной однопроводной линии электропередачи (РО ЛЭП) [2], которая включает: источник электрической энергии, преобразователь частоты ПЧ1, резонансный контур (C1, T1), собственно однопроводную ЛЭП (в виде одиночного высоковольтного кабеля) ОЛ, приемный резонансный контур (C2, T2), преобразователь частоты ПЧ2, к которому присоединяется одно- или трехфазная нагрузка (рис.1).

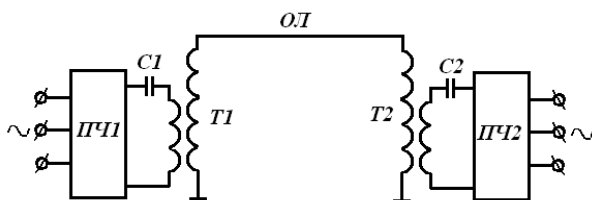


Рис. 1. Схема резонансной однопроводной ЛЭП

Источник электроэнергии – обычная трехфазная сеть, либо, в автономных системах, генератор переменного тока повышенной частоты. ПЧ1 служит для преобразования напряжения промышленной частоты в напряжение повышенной частоты в пределах 1-100 кГц.

Напряжение расчетной повышенной частоты подается в резонансный контур, включающий конденсатор C1 и модифицированный трансформатор Теслы T1. При расчетном соотношении индуктивностей «первичной» и «вторичной» обмоток и емкостей, включающих также и межвитковую емкость трансформатора T1, при соответствующей частоте в последнем

возникает резонанс напряжений. Условие возникновения резонанса в системе определяется общеизвестным выражением $T = 2\sqrt{LC}$.

При этом обязательно выполнение условия равенства произведений индуктивностей и емкостей в передающем и приемном контурах: $L_1 C_1 = L_2 C_2$.

Ток в высоковольтной обмотке сдвинут по отношению к напряжению на 90 град. Один вывод этой обмотки может быть заземлен, либо свободен. К другому выводу присоединяется одножильный кабель ОЛ расчетной длины. Длина ОЛ, включая длины кабеля, высоковольтных обмоток передающего и приемного трансформаторов, должна соответствовать целому числу полуволн $\lambda/2$, либо четверти волны тока. Длина линии l , резонансная частота f_0 , длина волны λ и скорость её распространения c_n связаны соотношениями: $l = n \lambda/2$; $f_0 = c_n/2l$; $\lambda = 2 l / n$, где n – натуральное число: 1, 2, 3, 4. Выходное напряжение передающего трансформатора Теслы равно напряжению линии и находится, в зависимости от передаваемой мощности и частоты, в пределах от единиц до 100 кВ и более.

Конец линии ОЛ присоединяется к входу высоковольтной обмотки приемного трансформатора Теслы T2, также работающего в резонансном режиме с частотой f_0 . К его «первичной» («низковольтной») обмотке подключают преобразователь частоты ПЧ2, на выходе которого получается требуемое трехфазное напряжение промышленной частоты.

Область частот 1-100 кГц наиболее пригодна для передачи электрической энергии по однопроводному волноводу в силу ограничений, которые накладывают потери на излучение из-за антенного эффекта.

При указанных выше соотношениях в линии возникают падающая и отраженная волны, и как результирующая – стоячая волна. Стоячие волны напряжения u и реактивного тока i_p резонансной линии длиной l_n показаны на рис. 2.

Для случая, приведенного на рис. 2, длина линии l_n равна двум длинам волны 2λ . Например, при частоте 1 кГц $\lambda = 300$ км, следовательно, $l_n = 600$ км.

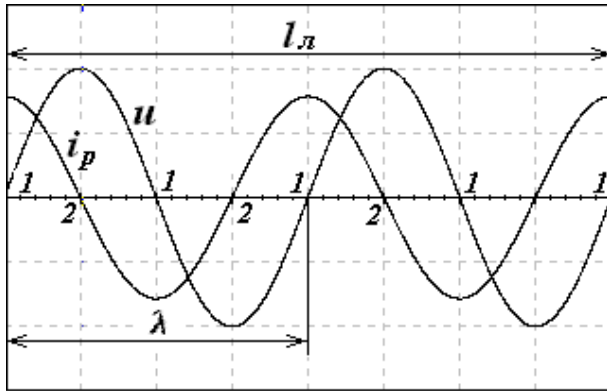


Рис. 2. Стоячие волны напряжения и тока резонансной линии

Пучности реактивного тока i_p линии наблюдаются в точках 1, в том числе – на зажимах источника электроэнергии и на зажимах электроприемника. В точках 1 имеются узлы напряжения u , в том числе в начале линии и в его конце. Другими словами, потенциалы в начале линии и его конце равны нулю. Поэтому начала высоковольтных обмоток трансформатора могут быть заземлены, что обычно и делается на практике.

Трансформаторы, используемые в рассматриваемой системе, выполнены в виде многослойной высоковольтной катушки, поверх которой наматывается несколько витков толстой первичной обмотки, поэтому традиционное для трансформатора Теслы условие неравенства взаимных индуктивностей первичной и вторичной обмоток не выполняется, т.е. $L_{12} \approx L_{21}$.

Поскольку резонансная однопроводниковая линия разомкнута, в ней нет активного тока, следовательно, электрические потери в линии можно принимать равными нулю. Ток линии является реактивным током перезарядки собственной емкости линии или, по Максвеллу, током смещения.

В принципе, передача электроэнергии от передающего трансформатора Теслы к приемному может осуществляться по сколь угодно тонкому проводу, а также и без провода.

Этот опыт в известной мере проясняет сущность разрядного реактивного тока, или тока смещения, который генерируется трансформатором Теслы, передается, в виде стоячей волны и преодолевает в данном случае два воздушных промежутка: большой – между двумя трансформаторами Теслы и малый – между трансформатором и цилиндром.

Указанные явления имеют место только в линии, длина которой кратна длине полуволны или четверти волны тока. Именно в такой линии возникает стоячая волна, как результат сложения падающей и отраженной волн. Резонанс, необходимый для возбуждения трансформаторов Теслы,

обеспечивает с одной стороны максимальную отдачу энергии, с другой – появление в линии преимущественно, либо исключительно реактивного тока, который не связан с джоулевыми потерями в обмотках трансформаторов и в линии. Это возможно в том случае, когда ток полностью или почти полностью выходит за пределы проводника и не взаимодействует, как это принято считать, с кристаллической решеткой металла провода. На то обстоятельство, что *основные* электромагнитные процессы при «протекании» тока происходят не в проводе, а в пространстве вокруг него, указывал ещё академик В.Ф. Миткевич в своем классическом труде «Магнитный поток и его преобразования».

Стоячая волна передающей антенны (волновода) представляет собой совокупность непрерывно сменяющих друг друга положительных и отрицательных зарядов с длиной волны λ . Эти заряды поляризуют окружающее пространство, вызывая в нем появление объемных, соответственно, отрицательных и положительных зарядов следующих вдоль волновода от источника к приемнику друг за другом.

Основное отличие РО ЛЭП от передающей антенны или волновода заключается в разнице частот. При радиочастотах происходит излучение энергии, тогда как при частотах в диапазоне 1-100 кГц излучение РО ЛЭП ничтожно мало, а энергия передается вдоль провода к приемнику. В системе РО ЛЭП совокупность непрерывно сменяющих друг друга положительных и отрицательных зарядов пространственно напоминающих вихревые тороиды, движутся вдоль волновода. В какой-то мере этот процесс иллюстрирует рис.3. Внутренний диаметр тороида близок к диаметру провода, а внешний определяется, по нашему мнению, частотой, величиной напряжения и плотностью зарядов внутри вихря, или, другими словами, величиной тока смещения. Ток смещения однопроводной линии можно в первом приближении определить выражением [2] $i_c = 2\pi (C_0/CT) d\rho/dz$, где: ρ - объемный заряд, К; C_0 - емкость линии, Ф; C - скорость распространения волны, м/с; T - период волны, с; z - координатная ось линии.

Каждый из движущихся объемных зарядов обладает собственным магнитным полем, как это условно представлено на рис. 3, а, причем полюса этих динамических магнитов в узлах тока – одноименные. На рис. 3,б показаны тороиды 1, 2 и 3, которые опять-таки условно могут дать представление об увеличении объемных зарядов (т.е. увеличение пучности тока) и соответствующих магнитных полях по мере роста реактивного тока и, соответственно, передаваемой мощности.

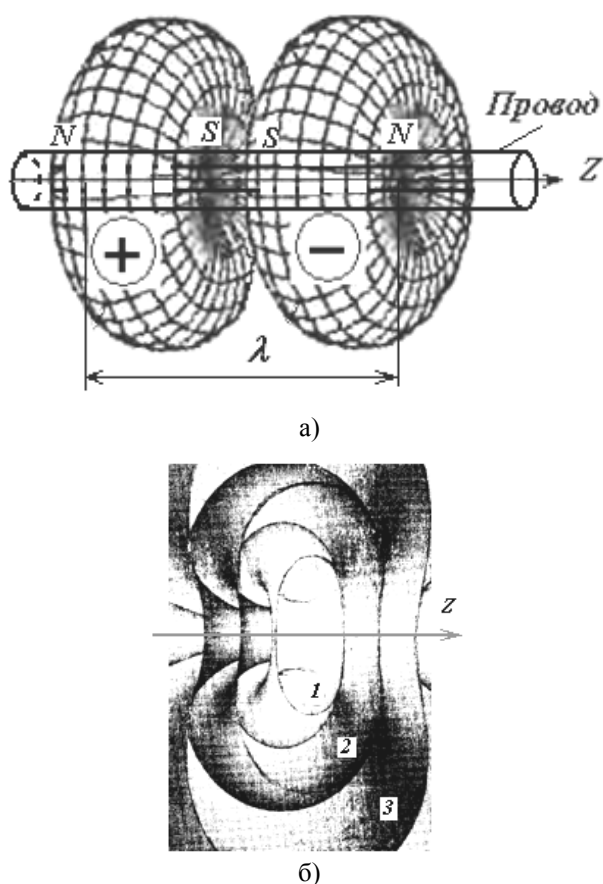


Рис. 3. Модели движения зарядов и магнитных полей вдоль проводника РО ЛЭП

Поверхности тороидов 1, 2, 3 и т.д. можно представить как совокупность «эквипотенциальных» магнитных силовых линий. Эти магнитные поля с одной стороны как бы «упаковывают» каждый объемный заряд, а с другой стороны, в силу взаимного отталкивания магнитных полюсов и отталкивания всего пакета от источника энергии – обеспечивают движение вдоль провода с осью Z со скоростью $c_n = 2 l f_0$. Генерирование такого рода тороидальных вихрей разноименных зарядов с собственными магнитными полями обеспечивает, как отмечал ещё Тесла, *безвозвратную передачу* электроэнергии от источника к приемнику.

Таким образом, в случае с РО ЛЭП мы имеем дело с продольными волнами, которые проходят не по сечению провода, а вдоль его поверхности, не входя в него. Из этого, в частности, следует, что для РО ЛЭП не имеет принципиального значения активное сопротивление провода и его сечение, т.е. в качестве проводника для неё можно использовать, например, тонкий стальной провод или трос, заключенные в изолирующую оболочку, либо подвешенный на высоковольтных изоляторах, как это делал Тесла.

В то же время для процессов передачи электроэнергии по этой линии значение имеет её собственная емкость и частота. Другими словами, однопроводная линия при идеальной настройке в номинальном режиме ведет себя как проводник без потерь. Для подтверждения этого представления при передаче по опытной резонансной линии электроэнергии мощностью 30 кВт, использовался наряду с кабелем с диаметром жилы 1,3 мм кусок провода диаметром 0,08 мм, который не испытывал существенного нагрева.

Отмеченные особенности объясняют и весьма высокие плотности передаваемой мощности и тока, невозможные в обычных ЛЭП. Так, эффективная плотность тока в линии при передаваемой мощности 20 кВт составила 600 А/мм^2 , а удельная электрическая мощность, передаваемая по линии – 4 МВт/мм^2 . Изложенные особенности позволяют считать, что РО ЛЭП – это линия, обладающая высокотемпературной квазисверхпроводимостью [2].

Очевидно, при высоких частотах волны будут излучаться в окружающее пространство, как это имеет место в обычной передающей антенне. Однако в указанном выше диапазоне частот эти потери невелики. Исследования [2] показали, что потери на излучение для линии, передающей 20 кВт, при частоте 3,4 кГц составили всего 102 Вт, т.е. $P_{изл} = 0,005 P_n$.

В целом потери в системе РО ЛЭП складываются из электрических потерь в преобразователях ПЧ1 и ПЧ2 и потерь на излучение. КПД современных преобразователей весьма высок. Поэтому интегральный КПД РО ЛЭП в сравнении с обычной ЛЭП может достигать до 94-96%. Потери в системе существенно снижаются, если в качестве источника электроэнергии непосредственно используется генератор повышенной частоты (1-50 кГц), приводимый во вращение первичным двигателем – дизелем или турбиной.

РО ЛЭП состоит из простых и надежных узлов. Воздушный трансформатор Теслы во всех отношениях проще и дешевле масляного. Применение генераторов повышенной частоты могло бы исключить преобразователи частоты и приблизить КПД РО ЛЭП к величинам порядка 98-99%. Но и с применением ПЧ РО ЛЭП обеспечивают колоссальную экономию электроэнергии. Одножильный кабель, уложенный в землю, требует минимального отвода земли, не сопряжен с экологическими проблемами.

РО ЛЭП обеспечивают высокую надежность электроснабжения, поскольку в них в принципе невозможно межфазное короткое замыкание, кабельным РО ЛЭП не страшны стихийные бед-

ствия: снегопад, гололед, ветры и т.д. Капитальные затраты на сооружение таких систем в несколько раз меньше, чем для обычных высоковольтных ЛЭП. РО ЛЭП – это высоковольтные системы – они хороши в качестве распределительных сетей. Однако наиболее эффективными из-за малых потерь являются дальние и сверхдальние РО ЛЭП. Такой подход может изменить идеологию энергоснабжения народного хозяйства: генерирующие мощности можно будет располагать непосредственно у месторождений, а вместо энергоносителей с их громоздкими и крайне дорогими системами транспортировки, передавать электрическую энергию, как наиболее универсальную для использования, по простой и надежной РО ЛЭП на любые расстояния с минимальными издержками.

Постановка задачи и её решение

В электротехнике общепринято анализировать распространение волн вдоль линии на основе решения телеграфных уравнений. Представляя телеграфные уравнения в матричной форме [3], 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:

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

Представим уравнение для комплексной амплитуды потенциала *k*-го провода

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

(*k*=1, 2, ...*n*)

и уравнение

$$\sum_{i=1}^n B_{ik} \cdot I_i = 0, \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} B_{KK} &= -\xi \cdot N_{KK} + F_{KK} + M_K; \\ B_{iK} &= -\xi \cdot N_{iK} + F_{iK} \end{aligned} \quad (4)$$

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

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

$$\begin{aligned} r_{ik} &= \sqrt{(h_i - h_k)^2 + (b_i - b_k)^2} \\ r'_{ik} &= \sqrt{(h_i + h_k)^2 + (b_i - b_k)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

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

$k_i = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$ - 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*, *p* и *r* 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:

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

Здесь квадратная недиагональная матрица коэффициентов распространения;

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

где $e^{-\|G\|X}$, $e^{\|G\|X}$ - экспоненциальные функции от квадратной матрицы $\|G\|X$, 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;

$\|\lambda\|$ - 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 производится 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:

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

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

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

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

Квадратная матрица фазных волновых сопротивлений вычисляется по формуле

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

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

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

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

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

$$\left. \begin{aligned} \text{ch} \|\Gamma\|l &= \|\lambda\| \text{ch} \|\gamma\| l \|\lambda\|^{-1} \\ \text{sh} \|\Gamma\|l &= \|\lambda\| \text{sh} \|\gamma\| l \|\lambda\|^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Связь между напряжениями и токами в начале и конце многопроводной линии (в общем случае $2n+1$ -полюсника) может быть пред-

ставлена 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 $2n+1$ -полосник, 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:

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tesla N. World System of wireless Transmission of Energy. Telegraph and Telephone Age, Oct, 16. 1927. Published in a book: Nikola Tesla. Selected works. Articles. Beograd, 1999, p. 280.
2. Стребков, Д. С. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. Изд.3-е /

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

где $\|N_T\|$ - матрица n -го порядка идеально-го 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:

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

В исходные данные вносится расчетная схема замещения. Определяются для данной схемы конкретные значения параметров ветвей нагрузки и источников напряжения, а также характеристики проводов линий.

Зная токи и напряжения в любой заданной точке резонансной однопроводной линии по методике изложенной в [4] определяются наведенные напряжения в смежной линии и электромагнитное влияние на коммуникации связи и цепи железнодорожной автоматики.

Заключение

Резонансные однопроводные системы обеспечивают передачу электроэнергии по единственному, весьма тонкому проводнику с минимальными потерями энергии. Они являются высокотехнологичными ресурсо- и энергосберегающими системами, и открывают возможности для тотальной замены ими существующих многофазных высоковольтных ЛЭП.

Методика распространения электромагнитных колебаний вдоль линий электроснабжения и смежных линий даёт возможность проводить обоснование электромагнитной совместимости линий электроснабжения с окружающей средой, инфраструктурой, коммуникациями связи и цепями железнодорожной автоматики.

REFERENCES

1. Tesla N. World System of wireless Transmission of Energy. Telegraph and Telephone Age, Oct, 16. 1927. Published in a book: Nikola Tesla. Selected works. Articles. Beograd, 1999, p. 280.
2. Strebkov D. S., Nekrasov A.V. *Rezonansnye metody peredachi i primeneniya elektricheskoy energii*

Д. С. Стребков, А. И. Некрасов. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. - 352 с.

3. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость. Учебник для студентов высших технических учебных заведений / М.П. Бадер. - М.: Транспорт, 2002 г. - 640 с.

[Resonance methods of transmission and use of electric energy]. Moscow, 2008. 280 p.

3. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost'. Uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Electromagnetic compatibility. A textbook for students of higher technical educational institutions]. Moscow, Transport Publ., 2002. 640 p.

Поступила в печать 25.02.2016.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

Рассмотрены резонансные однопроводные системы, которые обеспечивают передачу электроэнергии по единственному, весьма тонкому проводнику с минимальными потерями энергии. Проведенные исследования показывают, что они являются высокотехнологичными энергосберегающими системами, и открывают возможности для тотальной замены ими существующих многофазных высоковольтных ЛЭП.

Приведена методика распространения электромагнитных колебаний вдоль линий электрообеспечения и смежных линий, которая даёт возможность проводить обоснование электромагнитной совместимости линий электрообеспечения с окружающей средой, инфраструктурой, коммуникациями связи и цепями железнодорожной автоматики.

Ключевые слова: передача электрической энергии электромагнитными полями, резонансные однопроводные системы, высокотехнологичные энергосберегающие системы, распространение электромагнитных колебаний, электромагнитная совместимость.

УДК 621.331.3

М. П. БАДЬОР (МДУШС)

Кафедра Энергопостачання електричних залізниць, Московський державний університет шляхів сполучення, вул. Образцова 9, буд. 9, Москва, Російська Федерація, 127994, тел.: (495) 684-22-87, ел. пошта: badior@mail.ru

ПЕРЕДАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ І ЇХ ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Розглянуто резонансні однопровідні системи, які забезпечують передачу електроенергії по єдиному, досить тонкому провіднику з мінімальними втратами енергії. Проведені дослідження показують, що вони є високотехнологічними енергозберігаючими системами, і відкривають можливості для тотальної заміни ними існуючих багатофазних високовольтних ЛЕП.

Наведена методика поширення електромагнітних коливань уздовж ліній електропостачання і суміжних ліній, яка дає можливість проводити обґрунтування електромагнітної сумісності ліній електропостачання з навколишнім середовищем, інфраструктурою, комунікаціями зв'язку і ланцюгами залізничної автоматики.

Ключові слова: передача електричної енергії електромагнітними полями, резонансні однопровідні системи, високотехнологічні енергозберігаючі системи, поширення електромагнітних коливань, електромагнітна сумісність.

Внутрішній рецензент *Костин М. О.*

Зовнішній рецензент *Саенко Ю. Л.*

UDC 621.331.3

М. P. BADJOR (MSURE)

Department of Energy supply of electric railways, Moscow State University of Railway Engineering, 9 Obraztsova Street, build. 9, Moscow, Russia Federation, 127994, тел.: (495) 684-22-87, e-mail: badjor@mail.ru

TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY BY ELECTROMAGNETIC FIELDS AND ENVIRONMENTAL IMPACT

Review of the resonant single-conductor systems that enable the transmission of electricity on a extremely thin single wires with minimal loss of energy. Researches have shown that they are a high-tech energy-saving systems, and offer opportunities for a total replacement of the existing multi-phase high-voltage power lines.

The technique of propagation of electromagnetic waves along the power lines and related lines, which makes it possible to carry out study of electromagnetic compatibility of power supply lines to the environment, infrastructure, communications links and chains of railway automation.

Keywords: transmission of electrical energy by electromagnetic fields, resonant single-conductor systems, high-tech energy-saving system, the spread of electromagnetic waves, electromagnetic compatibility.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*