

Электротехника

УДК 621.315.1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДА МНОГОЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

А.С. Ведерников, В.Г. Гольдштейн, Е.М. Шишков

Самарский государственный технический университет

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: shishkov@smtp.ru

Рассмотрен вопрос математического моделирования и анализа квазистационарных процессов в многоцепной воздушной линии электропередачи в полевой постановке. Приведены аналитические выражения для определения составляющих векторов напряженностей магнитного и электрического полей в произвольной точке.

Ключевые слова: *многоцепная воздушная линия, электромагнитное поле, телеграфные уравнения.*

В условиях существенных ограничений на использование территорий для строительства воздушных линий (ВЛ) как элементов схем глубокого ввода использование комбинированных многоцепных ВЛ (МВЛ) является одним из эффективных решений, позволяющим не только значительно сократить площадь отчуждаемых под трассу ВЛ земель, но и снизить уровень напряженности электромагнитного поля вблизи ВЛ, что немаловажно в условиях густонаселенных районов современных мегаполисов.

Намечающаяся в последнее время тенденция к увеличению плотности сооружения ВЛ повышает актуальность целого спектра проблем, связанных с проектированием и эксплуатацией комбинированных и обычных МВЛ. Одной из таких проблем является расчет значений напряженности электрического поля у поверхности земли для определения границ санитарно-защитной зоны вдоль ее трассы. Согласно действующему СанПиН №2971-84 санитарно-защитная зона ВЛ определяется как территория вдоль трассы линии, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м. Очевидно, что тщательное моделирование возможных режимов работы МВЛ и вычисление значений напряженности на стадии проектирования можно рассматривать как предпосылки для уменьшения площади санитарно-защитных зон МВЛ и, следовательно, значительной экономии средств, затраченных на строительство в условиях высокой стоимости земельных участков в городской черте.

Физический процесс распространения электромагнитных волн вдоль МВЛ

Александр Сергеевич Ведерников (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электрические станции».

Валерий Геннадьевич Гольдштейн (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Евгений Михайлович Шишков, ассистент кафедры «Электрические станции».

включает в себя ряд явлений, учет которых усложняет его математическое описание. Сюда следует отнести нелинейные процессы, возникающие вследствие импульсной короны и намагничивания стальной сердцевины проводов и тросов, а также процессы, связанные с проникновением поля провода в землю, имеющую конечную проводимость. Кроме того, существенное влияние оказывают также дискретно заземленные грозозащитные тросы, провисание проводов и тросов МВЛ, неоднородность земли (например горизонтальная многослойность, токи смещения в земле и воздухе, «концевой» эффект вдоль линии и «волновой» эффект поперек линии, «эффект близости», дискретность вдоль линии токов утечки и токов смещения по гирляндам изоляторов и др.).

Математическое описание распространения электромагнитных волн в многокомпонентных системах и устройствах, таких как МВЛ, основано на анализе систем уравнений Максвелла, построенных для соответствующих электромагнитных полей [1]. При этом должны быть удовлетворены граничные условия на поверхностях раздела сред с различными характеристиками (воздух, земля с неоднородной структурой, провода, грозозащитные тросы, металлические конструкции и т. д.). Точное решение этой задачи для квазистационарных процессов разработано Г.А. Гринбергом и Б.Э. Бонштедтом [2] для однопроводной линии, а затем М.В. Костенко [3] и Л.С. Перельманом [4] для многопроводной. Сделанные при этом допущения, облегчающие инженерное решение задачи, предполагают отсутствие нелинейных процессов, связанных с импульсной короной, однородность земли и проводов МВЛ, параллельность проводов горизонтальной поверхности земли и между собой, пренебрежение «эффектом близости» и «концевым эффектом».

В настоящей работе предполагается, что многопроводная МВЛ состоит из m цепей, каждая из которых содержит по три фазных провода a_j , b_j и c_j . K грозозащитных тросов t_i изолированы от опор на всем протяжении линии. Схема МВЛ и обозначения ее геометрических размеров представлены на рисунке.

Таким образом, для определения электромагнитного поля в воздухе, земле и проводах необходимо решить уравнения Максвелла и удовлетворить граничным условиям на поверхностях раздела сред. Приняв зависимость электромагнитного поля от времени t и от расстояния вдоль оси координат x , параллельной проводам, в виде $e^{j(\omega t - \gamma x)}$, где γ – постоянная распространения, запишем уравнения Максвелла для каждой среды в виде

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \dot{H} = j\omega \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \dot{E}; \\ \operatorname{rot} \dot{E} = -j\omega \mu \dot{H}. \end{cases} \quad (1)$$

где \dot{E} и \dot{H} – напряженности электрического и магнитного полей;

ε , μ и σ – соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость, абсолютная магнитная проницаемость и проводимость среды.

Поскольку мы пренебрегаем «эффектом близости», для решения уравнений Максвелла можно воспользоваться принципом суперпозиции, приняв, что общее решение для полей в воздухе и земле представляет сумму частных решений для каждого провода МВЛ над землей, полученных в [5], а поле внутри провода описывается решением Зоммерфельда для одиночного провода.

Обозначим $\dot{E}_k^{(i)}$ и $\dot{H}_k^{(i)}$ – напряженности электрического и магнитного полей в среде i , созданные током k -го провода, причем в отношении сред обозначим индексом 0 – воздух, индексом g – землю, а индексами $a_1, b_1, c_1 \dots a_m, b_m$ и c_m – провода. В

собственных полярных координатах (x, r, θ) каждого провода создаваемое внутри и вне его поле определяется по формулам:

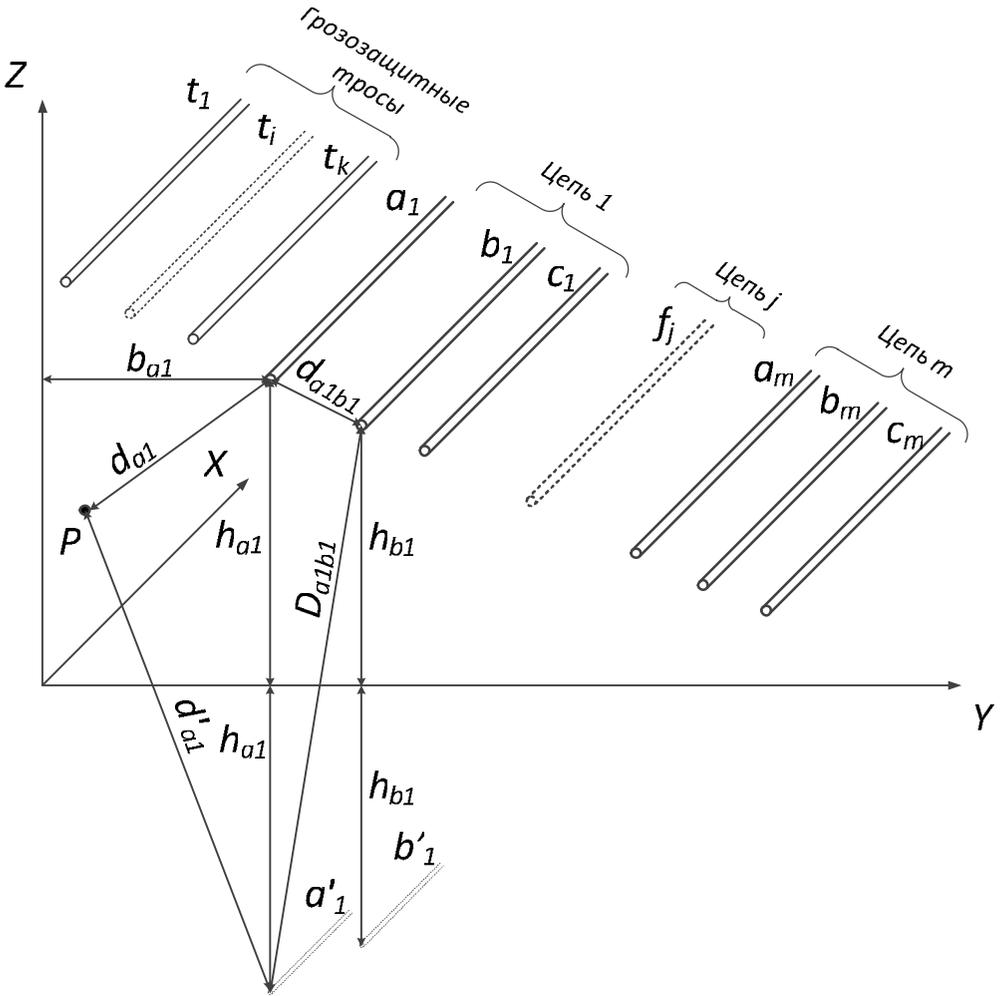


Схема многопроводной МВЛ

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_x^{(k)} = A_k J_0(m_k d_k); \\ \dot{E}_r^{(k)} = -\frac{j\gamma}{m_k} A_k J'_0(m_k d_k); \\ \dot{H}_\theta^{(k)} = -\frac{j\omega \left(\varepsilon - j \frac{\sigma_k}{\omega} \right)}{m_k} A_k J'_0(m_k d_k); \\ \dot{E}_\theta^{(k)} = \dot{H}_x^{(k)} = \dot{H}_r^{(k)} = 0, \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_{xk}^{(0)} = C_k H_0(m_0 d_k); \\ \dot{E}_{rk}^{(0)} = -\frac{j\gamma}{m_0} C_k H'_0(m_0 d_k); \\ \dot{H}_{\theta k}^{(0)} = -\frac{j\omega \varepsilon_0}{m_0} C_k H'_0(m_0 d_k); \\ \dot{E}_{\theta k}^{(0)} = \dot{H}_{xk}^{(0)} = \dot{H}_{rk}^{(0)} = 0, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $m_i = \sqrt{k_i^2 - \gamma^2}$, $k_i = \omega \sqrt{\mu_i \left(\varepsilon - j \frac{\sigma_i}{\omega} \right)}$;

d_k – расстояние, определяемое в соответствии с рисунком;

A_k и C_k – постоянные интегрирования;

J_0 и J'_0 – функция и производная функции Бесселя 1-го рода нулевого порядка;

H_0 и H'_0 – функция и производная функции Ханкеля 1-го рода нулевого порядка [4].

Суммарная продольная составляющая напряженности электрического поля в воздухе в произвольной точке P в соответствии с принципом суперпозиции имеет вид

$$\dot{E}_x^{(0)} = \sum_{k=1}^n C_k \left[H_0(m_0 d_k) - H_0(m_0 d'_k) + \frac{2jk_0^2}{\pi m_0^2} F_{kp} \right], \quad (3)$$

где $F_{kp} = 2 \int_0^{\infty} \frac{\eta_0 \eta_g - v^2}{k_g^2 \eta_0 + k_0^2 \eta_g} e^{-\eta_0(z_p + h_k)} \cos v(y_p - b_k) dv$,

b_k , h_k и d'_k – расстояния, определяемые в соответствии с рисунком;

z_p и y_p – координаты точки P , $\eta_0 = \sqrt{v^2 - m_0^2}$, $\eta_g = \sqrt{v^2 - m_g^2}$.

При выводе выражения (3) положено $\mu_g = \mu_0$.

Таким образом, выражение (3) определяет величину напряженности электрического поля в произвольной точке вдоль трассы МВЛ. Результаты данных вычислений могут быть использованы в процессе проектирования для поиска области, в которой величина напряженности электрического поля имеет значение более 1 кВ/м, что определяет границы санитарно-защитной зоны МВЛ в соответствии с действующим СанПиН.

Выводы

1. Получено аналитическое выражение для определения величин напряженности результирующего электрического поля вблизи проводов МВЛ при распространении по ним электромагнитных волн без учета влияния земли.

2. Найденное точное решение может быть использовано в проектировании МВЛ для определения границ санитарно-защитных зон вдоль трасс линий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. и др. Теоретические основы электротехники. Изд. 4, доп. Т. 3. – СПб.: Питер, 2003. – 364 с.
2. Гринберг Г.А., Боншtedт Б.Э. Основы точной теории волнового поля линии передачи // ЖТФ, том XXIV, вып. I. – 1954.
3. Костенко М.В., Перельман Л.С. К расчету волновых процессов в многопроводных линиях // Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. – 1963. – № 6.
4. Перельман Л.С. Уточнение теории распространения волн вдоль длинной многопроводной линии в связи с некоторыми техническими вопросами // Изв. НИИПТ. – 1963. – №10. – С. 103-120.
5. Костенко М.В. Распространение электромагнитных волн вдоль многопроводной линии // Электричество. – 1960. – №2.

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2012 г.

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE MULTICIRCUIT OVERHEAD POWER LINE WIRE OPERATING AT STATIONARY MODE

A.S. Vedernikov, V.G. Goldstein, E.M. Shishkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper deals with the problem of mathematical modeling and analysis of quasi-stationary processes in multicircuit overhead power transmission line in a field setting. The paper lists the analytical expressions for determining the components of strength vectors of the magnetic and electric fields at every point.

Keywords: *multicircuit overhead power transmission line, electromagnetic field, telegraph equations.*

*Alexander S. Vedernikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Valery G. Goldstein (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Evgeny M. Shishkov, Assistant.*