

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Исследование воздействия внешних электромагнитных полей на качество передаваемой энергии в кабельных линиях систем электроснабжения*

Денисова А. Р., Роженцова Н. В., кандидаты техн. наук

ФГБОУ ВПО “Казанский государственный энергетический университет”

Проанализированы основные уравнения электродинамики и теории дифракции, описывающие внешнее электромагнитное воздействие на проводящие линии. Получено аналитическое выражение, отражающее воздействие внешнего электромагнитного (ЭМ) поля на кабельные линии, имеющие слоистую структуру, и численно решена внутренняя задача дифракции для широкого сектора параметров падающей волны и кабельной линии. Исследовано распространение волн тока и напряжения, индуцированных внешним ЭМ полем, в длинных проводящих линиях с линейной и нелинейной нагрузками при учете потерь. Рассмотрена эволюция амплитуды и формы сигнала в линии под воздействием переменного во времени внешнего импульса.

Ключевые слова: электромагнитные поля, кабельные линии, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, волны тока и напряжения.

Для повышения эффективности систем электроснабжения необходимо исследовать воздействия внешних ЭМ полей на различные структуры электротехнических систем, в частности, на силовые кабельные линии (КЛ) высокого и низкого напряжения, а также на информационные каналы систем управления энергетическими объектами. Оценка токов и напряжений, наводимых этими полями в линиях, позволит предупредить ухудшение показателей качества передаваемой по КЛ электроэнергии, а также нагрев оболочек и, следовательно, уменьшить потери в линиях, снизить число пробоев изоляции КЛ и ложных срабатываний устройств РЗА.

Следует отметить, что в последние годы в системах электроснабжения России и других стран все большее распространение получают чувствительное электронное оборудование и компьютерная техника (всевозможные электронные аппараты защиты, средства компьютерного контроля и управления энергетическими системами и др.), использующие для передачи информации кабельные и радиоканалы. Кабельные каналы экранируют, но наводимые на внешних оболочках ЭМ поля все же частично проникают через экран и

отрицательно влияют на характеристики напряжений и токов в центральной жиле [1, 2]. Это обуславливает необходимость практического изучения степени такого влияния.

В качестве входных данных имеем полученное при численном моделировании задачи внутренней дифракции распределение составляющей напряженности электрического поля [1]

$$E_z(z) = (\vartheta^2 / k_0^2) e^{ik_0 z \cos \Theta} s_0 J_0(\vartheta r),$$

где $\vartheta^2 = k^2 - k_0^2 \cos^2 \Theta$ (для центральной жилы кабеля); k — волновое число для поля, возбуждаемого в центральной жиле (определяется с учетом ее собственных параметров); J_0 — функция Бесселя; ϑ — скорость распространения волны в жиле кабеля; Θ — угол падения волны; r — радиус соответствующего слоя проводящей линии; индекс 0 относится к падающей волне; s_0 выражается через функции Бесселя с учетом электрических параметров внешних по отношению к жиле слоев кабеля.

В отличие от весьма громоздкой и сложной процедуры вычисления потенциала, основанной на разложении с помощью формулы Якоби — Ангера, разность потенциалов в центральной жиле кабеля находили следующим образом:

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.В37.21.2072).

$$V_{z2} - V_{z1} = - \int_{z_1}^{z_2} E_z(z) dz.$$

При этом для интегрирования $E_z(z)$ вдоль оси жилы с целью обеспечения достаточно высокой точности результата использовали алгоритм Ньютона – Котеса с автоматическим выбором количества узлов ($m > 3$) соответствующей квадратурной формулы

$$U = V_{z2} - V_{z1} = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m A_i^{(m)} E_{lj}, \quad (1)$$

где $l = i + (m - 1)(k - 1)$; $A_i^{(m)} = (m - 1) \Delta z C_i^{(m)}$; $C_i^{(m)}$ — коэффициенты квадратурной формулы, причем m следует выбирать таким, чтобы выражение $(N - 1)/(m - 1)$ было целым; N — произвольное положительное число.

Аппроксимируя формулу (1), можно вычислять интеграл U с точностью $O(\Delta z^4)$ для $\Delta z \leq 0,1L$ [2] (где L — характерный масштаб, соответствующий порядку длины падающей на кабель волны). По вычисленным значениям U , используя закон Ома, определяли ток, возбуждаемый внешним полем в центральной жиле.

Поскольку $E_z(z)$ является в общем случае комплексной функцией, интеграл в соответствии с формулой (1) находили как сумму интегралов от действительной и мнимой частей и в последующих оценках использовали значения квадратов модулей $|U(z)|^2$ и $|I(z)|^2$. Во всех случаях полагали, что амплитуда падающего поля $E_{z0} = 100$ отн. ед., а погрешность вычислений не превышает 10^{-8} .

Результаты моделирования [3] наглядно подтверждают, что эффективность экранирования зависит от соотношения частоты падающей волны и геометрических размеров экрана. С ростом частоты она увеличивается. При частоте $f = 100\,000$ Гц в центральную жилу кабеля проникает существенно меньше 1% энергии внешней ЭМ волны. При этой частоте в силовом кабеле максимальные амплитуды напряжения $U_m = 0,085$ отн. ед. и тока $I_m = 0,9$ отн. ед., а в радиочастотном кабеле — $U_m = 0,0375$ отн. ед., $I_m = 0,29$ отн. ед., что вряд ли может влиять на качество передаваемой информации. Однако при меньших частотах такой вклад может быть значительным. Например, при частоте $f = 50$ Гц в силовом кабеле $U_m = 5$ отн. ед., $I_m = 40$ отн. ед., а в радиочастотном кабеле — соответственно 10 и 88 отн. ед. Таким образом, низкочастотное внешнее поле может существенно влиять

как на силовые (питающие), так и на информационные кабели.

Необходимость учета воздействия излучений внешних источников определяется исходя из значимости искажений, вносимых внешним ЭМ полем в передаваемую по линии информацию, включая выход за допустимые и нормативные пределы показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения, нарушения и сбои в управляющих и информационных каналах и т. п. Здесь прежде всего требуется оценить степень таких отклонений. Критическими являются случаи, когда наведенная волна находится в фазе и в противофазе с волной напряжения в кабеле.

Существенно важен вопрос о зависимости относительного вклада наведенного напряжения от амплитуды внешнего поля E и собственного напряжения в линии U . Дело в том, что все представленные в [3] результаты для соответствующих функций (U и I) с целью иллюстрации эффекта суперпозиции приведены в относительных единицах при $E = 100$, $U = 220\sqrt{2}$. Для практического же определения относительного значения вклада его, естественно, следует оценивать при конкретных значениях E и U . С этой целью нами было выполнено моделирование для диапазонов напряженности поля внешнего источника E от 100 до 3000 В/м и напряжения в линии U от 220 до 10 000 В. Результаты представлены в виде номограммы зависимости относительного вклада поля внешнего источника $|\delta_{max}|$, %, от соотношения амплитуд E и U (рис. 1). По ней можно легко и достаточно быстро оценить отклонение от номинальной амплитуды напряжения (а следовательно, и тока) в жиле кабеля, вызванное полем какого-либо внешнего источника известной (например, измеренной) напряженности.

Следующим важным этапом исследований является изучение распространения наведенных на проводящую линию волн тока и напряжения (ВТН). Эволюция ВТН в этом случае описывается системой неоднородных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \partial_t I &= \hat{A}[I, U, R, L] = 0; \\ \partial_t U &= \hat{B}[I, U, C, G] = f(t, x), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

правая часть одного из которых содержит функцию $f(t, x) = C\psi(x)dQ(t)/dt$ описывающую начальные возмущения, возникающие в этой линии [4] при $-\infty < x < \infty$, $t > 0$. Здесь \hat{A} и \hat{B} — некоторые функционалы; R, C, L, G —

распределенные параметры (соответственно сопротивление, емкость, индуктивность и коэффициент утечки), рассчитанные на единицу длины; Q — заряд источника возмущения; ψ — функция, описывающая геометрию задачи.

Выражение для $f(t, x)$ может отражать действие некоторого источника зарядов в кабеле (например, такого, как разряд молнии). Основной причиной появления критических перенапряжений в проводнике, индуцированных разрядом молнии, в данном случае будет возникновение ВТН вследствие растекания зарядов, “подтянутых” электростатическим полем грозового облака. При быстром разряде облака такие заряды на проводнике, находящемся в плохо проводящей среде, растекаются по оболочке кабеля, образуя ВТН.

При рассмотрении линий с распределенными источниками и линейной нагрузкой функционалы выражаются равенствами:

$$\left. \begin{aligned} \hat{A} &= (\partial_x U + RI) / L; \\ \hat{B} &= (\partial_x I + GU) / C, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

и тогда уравнения (2) представляют собой систему неоднородных телеграфных уравнений.

Такую систему можно решить как аналитически, так и численными методами. Однако в первом случае вычисления получаются весьма громоздкими и не позволяют полностью оценить свойства исследуемой системы. В связи с этим на базе конечно-разностного подхода выполнялось численное моделирование эволюции ВТН в соответствии с уравнениями систем (2) и (3) для широкого спектра значений параметров линии R, C, L, G с разными начальными условиями, включая нулевые.

С целью решения данной задачи, аппроксимируя производные в уравнениях (2) и (3) конечно-разностными представлениями для левых частей, можно составить простую явную схему первого порядка точности относительно временного шага. Однако, как показывает анализ устойчивости, даже для однородного случая, когда $f(t, x) = 0$, условие Неймана для такой схемы не выполняется и ее нельзя применять для численного моделирования. Поэтому используют схему Лакса, которая позволяет за счет введения в схему центрирования по времени получить устойчивое решение [4]. Такой подход осуществлялся при моделировании эволюции ВТН на сравнительно малых временных интервалах, поскольку соотношение временного и про-

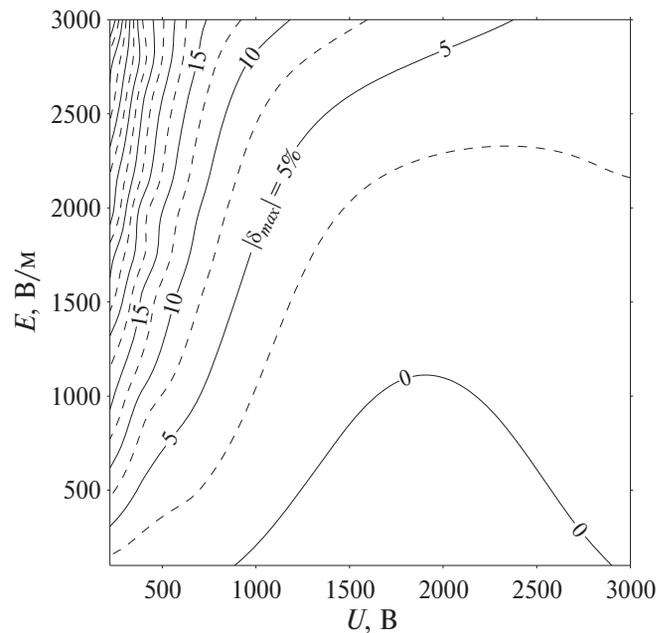


Рис. 1

странственного шагов сетки, задаваемое условием устойчивости Неймана для схемы Лакса, оказывается весьма малым. При исследовании эволюции импульсов ВТН на достаточно больших временных интервалах составлялась неявная схема, реализация которой осуществлялась методом монотонной прогонки.

Таким образом, получены численные решения, описывающие распространение ВТН в КЛ с учетом влияния внешнего источника для различных значений параметров R, C, L, G . Примеры решений для источника, описываемого функцией $f(t, x) = \exp[-(t - t_0)^2 / l_t^2] \exp(-x^2 / l_x^2)$ для $L = 10^{-7}$ Гн/м, $C = 10^{-10}$ Ф/м, $t_{max} = 50$ мкс приведены на рис. 2 и 3 соответственно для линий без учета потерь и с их учетом — при $R = 10^{-3}$ Ом/м, $G = 10^{-6}$ 1/(Ом·м).

При моделировании для начальных условий, отличных от нулевых, были получены решения, описывающие воздействие ВТН на характеристики тока и напряжения в линии как синусоидальной, так и более сложной формы для широкого диапазона частот (включая промышленную).

В случае, когда рассматривается линия, включающая распределенные нелинейные элементы электрической сети (диоды, выпрямители, тиристоры, разрядники, а в ряде случаев и силовое оборудование), функционалы в системе (2) принимают вид:

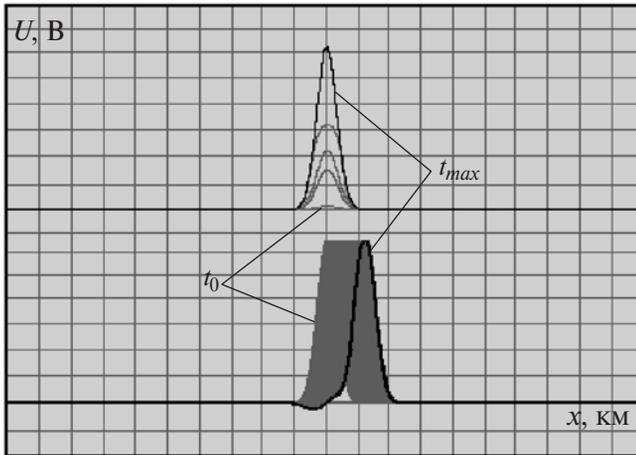


Рис. 2

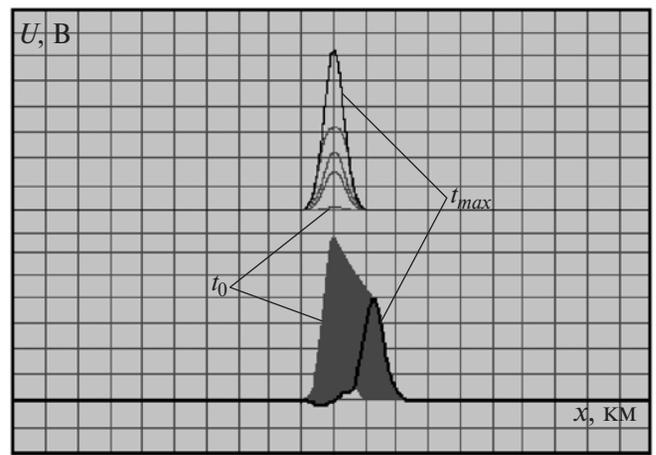


Рис. 3

$$\hat{A} = (\alpha_1 I \partial_x U + \beta_1 \partial_x^3 U + RI) / L;$$

$$\hat{B} = (\alpha_2 U \partial_x I + \beta_2 \partial_x^3 I + GU) / C,$$

и мы имеем систему связанных уравнений Кортевега – де Вриза с резистивными членами. В численных экспериментах для такой системы уравнений при различных начальных условиях и значениях параметров R , C , L , G наблюдалось следующее. Для $R = G = 0$ (линия без потерь) либо из начального импульса формировался солитон ВТН, либо для достаточно больших α_i/β_i ($i = 1, 2$) начальный импульс распадался на последовательность устойчивых солитонов. При достаточно малых потерях в линии (R и G невелики) на начальной стадии формировались солитоноподобные импульсы ВТН с крутыми передними фронтами, амплитуды которых в процессе распространения экспоненциально затухали. В случае больших R и G импульсы солитонного типа не формировались.

В численных экспериментах также установлено, что при некоторых специальных

начальных условиях (форма ВТН при $t = 0$) для определенных значений параметров линии возможно параметрическое усиление напряжений и токов. Результаты численного интегрирования, полученные для различных форм функционалов \hat{A} и \hat{B} , определяемых элементами электрической цепи, и различных модельных функций возмущающих источников, описывают эффекты воздействия индуцированных ВТН на параметры изначально невозмущенных функций $I(t, x)$ и $U(t, x)$ в кабельных линиях различного назначения (включая питающие и информационные радиочастотные кабели). Анализ результатов выявил случаи значимого изменения амплитуды результирующего напряжения, а также генерации высших гармоник и умножения частоты, т. е. значительного ухудшения показателей качества передаваемой по КЛ электрической энергии.

В заключение следует отметить, что полученные результаты позволяют оценить отклонение амплитудных значений напряжений и токов в линии от номинальных, нарушение

синусоидальности питающего напряжения, величину вклада высокочастотных гармоник, а также искажение цифровых управляющих сигналов, передающихся по радиочастотным (экранированным) кабельным линиям. Используя разработанную методику моделирования распространения ВТН в длинных проводящих линиях с линейной и нелинейной нагрузками, можно исследовать эволюцию амплитуды и формы сигнала под воздействием переменного во времени внешнего источника от параметров линии, что важно при решении проблемы обеспечения качества электрической энергии.

Приведенные данные представляют интерес при решении задач, связанных с вопросами электромагнитной совместимости, помехозащищенности и надежности функционирования электроэнергетических систем и их элементов при воздействии на них внешних ЭМ

полей как на этапах проектирования и монтажа оборудования, так и в процессе его эксплуатации.

Список литературы

1. Гамазин С. И., Цырук С. А., Зинчук Д. Е. Импульсные напряжения в низковольтных распределительных сетях, вызванные коммутационными процессами. — Промышленная энергетика, 2000, № 3.
2. Гамазин С. И., Цырук С. А., Зинчук Д. Е. Импульсные напряжения в низковольтных распределительных сетях, вызванные молниезарядами. — Промышленная энергетика, 2000, № 2.
3. Белашов В. Ю., Денисова А. Р. Воздействие внешнего электромагнитного поля на кабельные линии. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2003, № 11 – 12.
4. Белашов В. Ю., Денисова А. Р. Моделирование напряжений и токов, возбуждаемых внешним ЭМ полем в кабельной линии. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2004, № 11 – 12.

denisova_ar@mail.ru