



Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.18721/JCSTCS.10206

УДК 004.942

ШАГОВЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ГРОЗОЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

Д.С. Шишигин, С.Л. Шишигин

Вологодский государственный университет,
г. Вологда, Российская Федерация

Удар молнии в воздушную линию электропередач вызывает волну перенапряжения, которая может быть опасна для электрооборудования электрических подстанций. Моделирование волновых процессов обычно проводится в программе ЕМТР на основе цепных схем. Проблемой является осцилляция напряжения при воздействии импульса тока с коротким фронтом, что связано с использованием формулы трапеций для интегрирования дифференциальных уравнений. Комбинация формулы трапеций с неявной формулой Эйлера, предлагаемая в ЕМТР, не решает проблемы. Идея работы заключается в адаптации и применении хорошо разработанных цепно-полевых моделей, методов и программ теории заземления в задачах грозозащиты. Тогда волновые процессы моделируются совместно с процессами растекания тока в заземлителях. Показаны очевидные преимущества формул интегрирования высокого порядка Влаха и Сингала по сравнению с формулой трапеций. В качестве практического примера рассчитаны волны перенапряжения на силовом и измерительном трансформаторе подстанции, обусловленные ударом молнии в опору воздушной линии с перекрытием изоляции. Показан эффект от установки ОПН.

Ключевые слова: грозозащита; волновые процессы; ЕМТР; формула трапеций; метод Влаха; шаговые алгоритмы; перенапряжения; численное моделирование; электрическая подстанция; ОПН.

Ссылка при цитировании: Шишигин Д.С., Шишигин С.Л. Шаговые алгоритмы расчета волновых процессов в задачах грозозащиты электрических подстанций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 75–84. DOI: 10.18721/JCSTCS.10206

STEP ALGORITHMS FOR WAVE PROCESSES CALCULATION IN PROBLEMS OF LIGHTNING PROTECTION AT ELECTRIC POWER SUBSTATIONS

D.S. Shishigin, S.L. Shishigin

Vologda State University,
Vologda, Russian Federation

When lightning strikes into an overhead transmission line, a voltage surge occurs that can be dangerous for electrical equipment at electric power substations. Wave

processes modeling is usually carried out in the EMTP program which is based on circuit models. The problem is the voltage oscillations caused by short front impulse current due to the use of trapezoid formula for differential equations integration. The combination of trapezoid and implicit Euler formulas, suggested in EMTP, does not solve the problem. The idea of this paper is adaptation and application of well-developed hybrid (EM field-circuit) models, methods and programs of the grounding theory for lightning protection problems. This way, wave processes are simulated together with current spreading processes in grounding conductors. The evident advantages of Vlach's and Singhal's high-order integration formulas compared to the trapezoid formula are shown. As a practical example, we have calculated voltage surges at power and measuring transformers of a substation caused by a lightning strike into a transmission line tower with insulator flashover. The effect of mounting surge arresters is shown.

Keywords: lightning protection; wave processes; EMTP; trapezoid formula; Vlach method; step algorithms; voltage surge; numerical modeling; electric power substation; surge arrester.

Citation: Shishigin D.S., Shishigin S.L. Step algorithms for wave processes calculation in problems of lightning protection at electric power substations. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 75–84. DOI: 10.18721/JCSTCS.10206

Разряд молнии в грозозащитный трос или опору воздушной линии (ВЛ) с последующим перекрытием линейной изоляции, а также прорыв молнии на провода вызывает волну перенапряжения, распространение которой опасно для электрооборудования электрической подстанции (ПС) [1].

Наиболее часто задачи грозозащиты ВЛ и ПС решаются с помощью программы EMTP, например [1, 2]. Это мощная схемотехническая программа, включающая элементы электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, достоинства которой хорошо известны.

К недостаткам EMTP многие зарубежные исследователи относят формулу трапеций, используемую для интегрирования дифференциальных уравнений, поскольку она приводит к осцилляциям напряжения при воздействии импульсов тока с коротким фронтом [3]. Комбинация формулы трапеций с неявной формулой Эйлера [4], рекомендуемая EMTP, не снимает проблему.

Результаты моделирования волновых процессов в проводах ВЛ и шинах ПС существенно зависят от процессов растекания тока молнии в заземлителях [5]. Учет всех гальванических, емкостных и особенно магнитных связей (весьма сильных при импульсных воздействиях) между проводниками в земле и воздухе, с учетом 3D геометрии системы — необходимое условие адекватности расчетов. От цепных моделей,

предлагаемых в EMTP, все чаще переходят к электромагнитным моделям с использованием программы FDTD [6]. Главной проблемой здесь остается описание множества тонких проводников с помощью ортогональных сеток, несмотря на значительные усилия по преодолению этого ограничения. Теория антенн или теория заземления, оперирующие с произвольными тонкими проводниками, не требующие искусственного замыкания расчетной области в задачах открытого типа, значительно эффективнее.

В теории заземления хорошо зарекомендовали себя гибридные (цепно-полевые) модели тонких проводников, позволяющие проводить расчеты переходных электромагнитных процессов и полей одновременно [7, 8]. Это позволяет решать весь комплекс задач заземления, молниезащиты и электромагнитной совместимости (ЭМС) на ПС по единым моделям, методам, программам с использованием общей геометрической модели проводников.

Цели настоящей работы — моделирование волновых процессов в проводниках ВЛ и ПС с учетом растекания тока в земле на основе моделей, методов и компьютерных программ теории заземления и описание преимуществ шаговых алгоритмов расчета переходных (волновых) процессов во временной области с использованием формул высокого порядка, разработанных Влахом и Сингхалом, по сравнению с формулой

трапеций, используемой в ЕМТР и многих аналогичных программах.

Цепно-полевая модель тонкого проводника. Проводники дробятся на цилиндрические элементы малой (по сравнению с длиной электромагнитной волны) длины (рис. 1 а). Для проводников некруглого сечения найдены эквивалентные радиусы [7]. Элементы описываются квадратными, полностью заполненными матрицами проводимостей растекания G , индуктивности M и емкостных коэффициентов C , которые рассчитываются в статическом приближении интегральными методами теории поля [7]. Каждому элементу ставится в соответствие П-четырёхполюсник, что дает цепную схему. Элементы матриц G и C , найденные в средних точках элементов, переносятся в узлы [7]. Получается сложная электрическая схема, топология и параметры которой определяются автоматически. Напряжения и токи в этой схеме рассчитываются матричными методами теории цепей. При расчетах шаговыми алгоритмами нелинейные сопротивления моделируются статическими сопротивлениями с кусочно-постоянными характеристиками, величины

которых определяются в начале каждого временного шага. Разработаны эффективные алгоритмы учета частотно-зависимых сопротивлений во временной области [7]. После расчета токов в цепной модели возвращаемся к полевой модели для расчета напряженностей электрического и магнитного поля.

Шаговые алгоритмы расчета переходных процессов при импульсных воздействиях. Метод дискретных схем. Разобьем временной интервал на n равных шагов длиной h и выполним интегрирование дифференциальных соотношений между напряжениями и токами индуктивности и емкости на k -м временном шаге.

При использовании неявной формулы Эйлера:

$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow u_{k+1} = L \frac{i_{k+1} - i_k}{h} = \frac{L}{h} i_{k+1} - \frac{L}{h} i_k = R i_{k+1} + E_k, \tag{1}$$

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow i_{k+1} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} = \frac{C}{h} u_{k+1} - \frac{C}{h} u_k = G u_{k+1} + J_k. \tag{2}$$

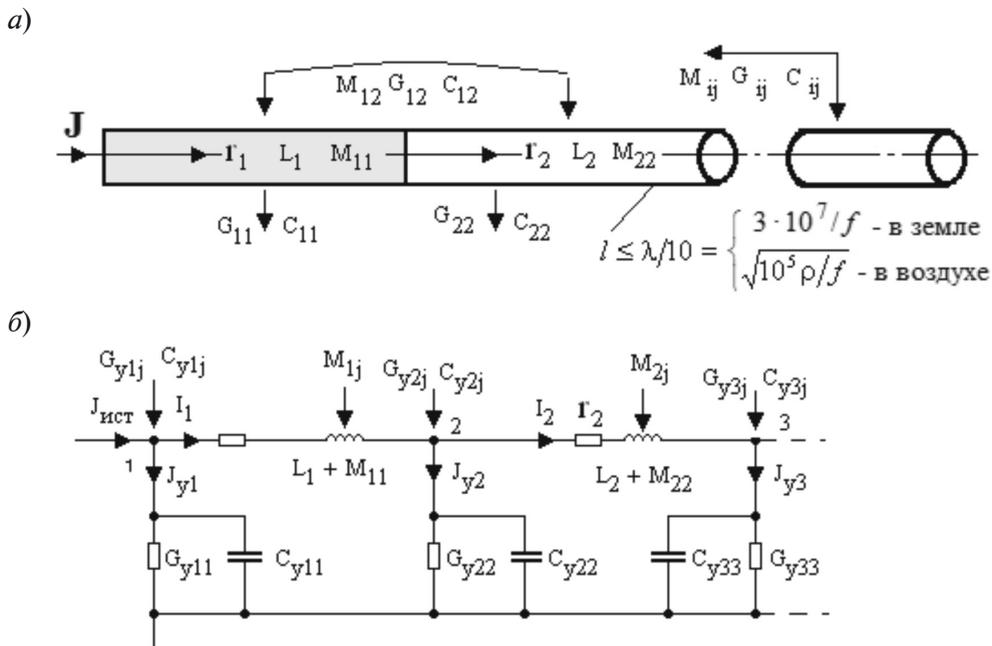


Рис. 1. Цепно-полевая модель тонкого проводника

Fig. 1. Hybrid (EM field-circuit) thin-wire model

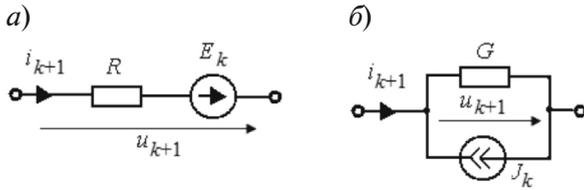


Рис. 2. Дискретные схемы замещения индуктивности (а) и емкости (б) на k -м шаге
Fig. 2. Equivalent discrete circuits of inductance (а) and capacitance (б) at k -step

При использовании формулы трапеций

$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{u_{k+1} + u_k}{2} = L \frac{i_{k+1} - i_k}{h} \Rightarrow u_{k+1} = \frac{2L}{h} i_{k+1} - \left(u_k + \frac{2L}{h} i_k \right) = Ri_{k+1} + E_k, \quad (3)$$

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow \frac{i_{k+1} + i_k}{2} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} \Rightarrow i_{k+1} = \frac{2C}{h} u_{k+1} - \left(i_k + \frac{2C}{h} u_k \right) = Gu_{k+1} + J_k. \quad (4)$$

Этим уравнениям соответствуют дискретные схемы замещения (рис. 2)

Таким образом, замена индуктивностей и емкостей дискретными резистивными моделями позволяет заменить дифференциальные уравнения алгебраическими, а задача расчета переходного процесса сведена к расчету резистивных цепей на каждом временном шаге. Матрицы сопротивлений \mathbf{R} и проводимостей \mathbf{G} вычисляются один раз и не меняются при $h = \text{const}$, что обеспечивает высокое быстродействие при расчете сложных цепей. Пересчету подлежат величины источников ЭДС и тока, которые задают начальные напряжения и токи шага, но это не снижает быстродействие.

Недостатки формул Эйлера и трапеций известны, например [9]. Формула Эйлера недостаточно точна и сглаживает колебания, аналогично фильтру низких частот, поэтому используется редко. Формула трапеций при определенных условиях вызывает несуществующие высокочастотные затухающие колебания, что является проблемой в задачах грозозащиты, при импульсных воздействиях.

Покажем эту проблему на примере [4].

К индуктивности L применен импульс тока с линейным фронтом длительностью T с единичной амплитудой (рис. 3). Требуется найти напряжение на индуктивности. Выберем шаг интегрирования $h = T$ и применим формулу трапеций (3). Сделаем несколько шагов при $L/h = 1$

$$\begin{aligned} i_0 &= 0, i_1 = i_2 = \dots = i_n = 1, \\ u_0 &= 0, \\ u_1 &= 2L/h \cdot i_1 - (u_0 + 2L/h \cdot i_0) = 2, \\ u_2 &= 2L/h \cdot i_2 - (u_1 + 2L/h \cdot i_1) = -2, \\ u_{k+1} &= -u_k. \end{aligned}$$

Таким образом, решение осциллирующее. Численные расчеты с различными шагами также приводят к осциллирующему решению (рис. 3). Интересно, что неявная формула Эйлера (1) дает в этой задаче точное решение $u_0 = 0, u_1 = 1, u_2 = u_3 = \dots = u_n = 0$.

Для устранения данной проблемы в [4] предлагается линейная комбинация формулы трапеций с неявной формулой Эйлера:

$$\begin{aligned} i_{k+1} &= \alpha \left[i_k + \frac{h}{L} u_{k+1} \right] + \\ &+ (1 - \alpha) \left[i_k + \frac{h}{2L} (u_{k+1} + u_k) \right] = \\ &= i_k + \frac{h}{2L} [u_{k+1}(1 + \alpha) + u_k(1 - \alpha)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha = 0,15$ – весовой коэффициент.

Этой формуле приближенно соответствует схема замещения, где параллельно индуктивности включается резистор с проводимостью $G = 0,15h/2L$ (рис. 3). Данная методика рекомендуется руководством к программе ЕМТР.

При исследовании (5) установлено: 1) этот способ не позволяет исключить осцилляции (см. рис. 3); 2) значение $\alpha = 0,15$ получено эмпирически, оно не является универсальным, оптимальный весовой коэффициент α зависит от шага h ; 3) схемная реализация (5) в виде GL цепи не является точной – требуется включить еще источник тока с изменяющимися на каждом шаге параметрами, что пользователю сделать невозможно. Таким образом, рассмотренный способ, рекомендуемый в ЕМТР, нельзя считать эффективным.

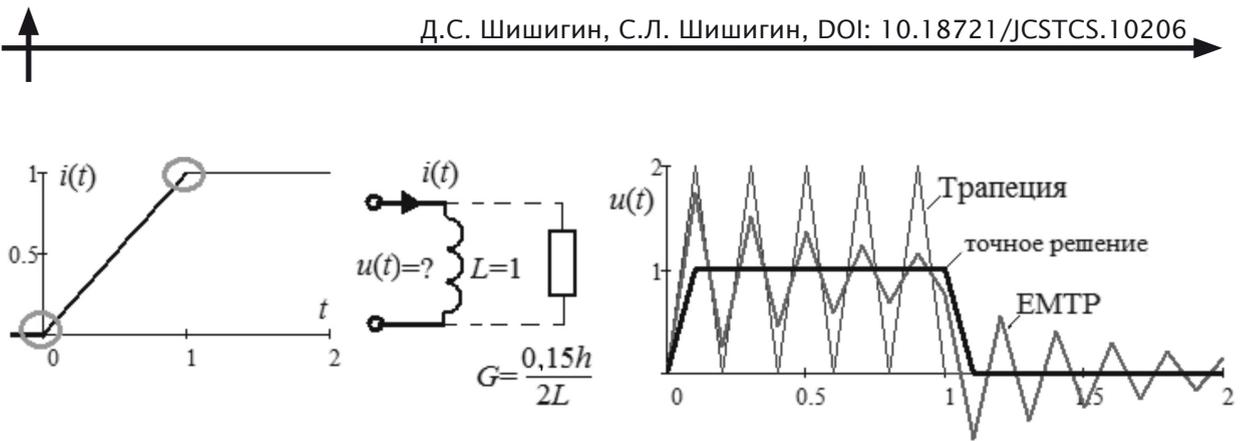


Рис. 3. К исследованию формулы трапеций и способа EMTP по устранению осцилляций
 Fig. 3. Research of trapezoid formula and EMTP method of oscillations elimination

Исследование других формул интегрирования для разработки дискретных моделей индуктивности и емкости – очевидное направление развития метода дискретных схем. Одношаговые формулы более высокого порядка (Рунге–Кутты) не обладают абсолютной устойчивостью [10], поэтому из рассмотрения исключаются. Для решения жестких задач возможно применение многошаговых формул «с забеганием вперед» (формула Гира и др.), но они ведут к нелинейным моделям и существенно усложняют алгоритм. Наиболее эффективный подход к получению дискретных схем, типа изображенных на рис. 2, на основе абсолютно устойчивых, одношаговых формул интегрирования высокого порядка дает операторный метод.

Шаговые алгоритмы Влаха и Сингхала на основе операторного метода. Операторная схема замещения индуктивности – последовательное соединение операторного сопротивления sL и ЭДС $E = Li(0)$, учитывающей начальные условия. Операторная схема замещения емкости – параллельное соединение проводимости $G = sC$ и источника тока $J = Cu(0)$. Заменяв все индуктивности и емкости их операторными моделями, получаем операторную схему замещения. При численных расчетах необходимо задать значение оператора s (его часто называют комплексной частотой), а для перехода к оригиналу применить теорему о вычетах. Обычно она записывается в виде $f(t) = \sum_i \text{Res}_s F(s_i) e^{s_i t}$, где вычеты операторной функции $F(s)$ находим в полюсах s_i . Нахождение полюсов – трудоемкая

операция, которую приходится выполнять заново для каждой операторной функции, поэтому этот путь неэффективен при численных расчетах.

Канадские ученые И. Влах и К. Сингхал предложили в теореме о вычетах вместо полюсов операторной функции использовать полюса экспоненты [11]:

$$f(t) = \sum_i \text{Res}_{z_i} F(z_i / t) e^{z_i t}, \quad z = st.$$

Достоинство этой записи в том, что полюса экспоненты вычисляются аналитически один раз, а затем применимы для любой операторной функции.

Аппроксимируем экспоненту дробно-рациональной функцией, коэффициенты которой найдем из сопоставления с разложением экспоненты в ряд Тейлора:

$$e^z \approx \frac{a_0 + a_1 z + \dots + a_n z^n}{1 + b_1 z + \dots + b_m z^m}, \quad m > n.$$

Например, для практически важного случая $m = 2, n = 1$:

$$e^z \approx (1 + z / 3) / (1 - 2z / 3 + z^2 / 6).$$

Определив полюса экспоненты, теорема вычетов принимает вид [11]:

$$f(t) = \text{Re}((5\sqrt{2}j - 2)F(s)) / t, \quad (6)$$

$$s = (2 + \sqrt{2}j) / t, \quad t > 0.$$

Полученная формула имеет 3 порядок точности ($m + n = 3$) и для ее использования необходимо вычислить операторную функцию один раз. Далее имеет смысл рассматривать формулы 7, 11, 15 и т. д. порядка с 2, 3, 4 и т. д. вычислениями операторной функции. Все они абсолютно устойчивы при интегрировании тестового дифферен-

циального уравнения $x' = \lambda x$ при $\lambda < 0$ [11].

Рассмотрим шаговый алгоритм на основе (6). Временной интервал разбивается на n равных шагов длиной h . Поскольку s – комплексное число (комплексная частота), то расчету на каждом k -м шаге подлежит комплексная схема, где индуктивности и емкости моделируются дискретными схемами (см. рис. 2) при $R = sL$, $E_k = Li_k$, $G = sC$, $J_k = Cu_k$. При фиксированном шаге сопротивления R и проводимости G не меняются, что обеспечивает высокое быстродействие расчета сложных схем. Переменными являются источники ЭДС и тока, учитывающие начальные условия шага.

Таким образом, шаговые алгоритмы Влахы и Сингхала полностью совпадают с шаговыми алгоритмами метода дискретных схем на основе формул Эйлера и трапеций, но имеют более высокий порядок точности и оперируют с комплексными схемами. Поэтому мы вправе отнести их к методу дискретных схем.

Тестирование шаговых алгоритмов. Рассчитаем волновые процессы в линии без потерь длиной 300 м, при воздействии импульса напряжения амплитудой 1 В, с линейным фронтом 0,1 мкс (рис. 4).

Будем рассматривать напряжение в конце линии, в режиме холостого хода. Точное решение дает теория длинных линий. В течение 1 мкс, что равно времени пробега электромагнитной волны от начала до конца линии (запаздывания), напряжение равно нулю. Затем возникает отраженная волна, равная падающей волне, и напряжение удваивается, что продолжается 2 мкс. За это время отраженная волна распространяется к началу линии и возвращается обратно с изменением знака (режим КЗ для идеального источника ЭДС). Теперь отраженная волна противоположна падающей волне, и результирующее напряжение равно нулю. Процесс повторяется с периодом 4 мкс (рис. 4, график 0).

Выполним расчеты по разным форму-

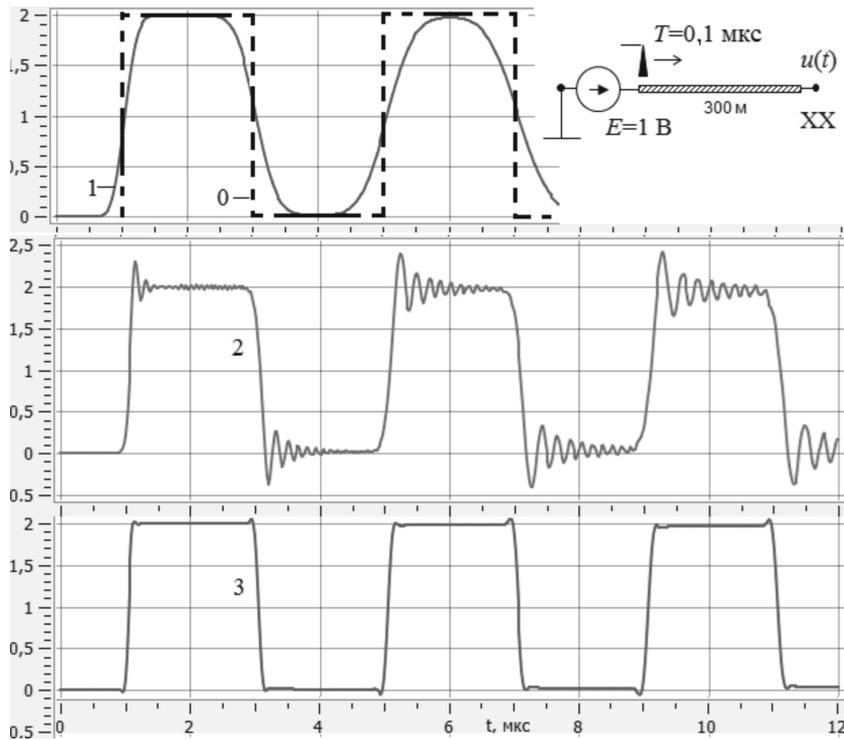


Рис. 4. Напряжение в конце линии длиной 300 м в режиме холостого хода: 0 – точное решение; 1 – формула Эйлера; 2 – формула трапеций; 3 – формула (6)

Fig. 4. Voltage at the end of the transmission line (300 m length, no load mode): 0 – exact solution; 1 – Euler formula; 2 – trapezoid formula; 3 – formula (6)

лам интегрирования. Использование формулы Эйлера (рис. 4, график 1) приводит к заметной погрешности так, что скорость волны превышает скорость света. Формула трапеций правильно моделирует запаздывание волны, но приводит к локальным затухающим колебаниям и большой погрешности (рис. 4, график 2). Амплитуда этих колебаний нарастает с каждым периодом и может привести к нарушению устойчивости.

Формула (6) моделирует процессы (рис. 4, график 3) с достаточной точностью (2 %). Опыт использования (6) позволяет рекомендовать ее в качестве альтернативы формулы трапеций, используемой в настоящее время в программе EMTP и других аналогичных программах.

Программное обеспечение. Рассмотренные модели и методы реализованы в программе ЗУМ, предназначенной для решения комплекса задач молниезащиты, заземления, ЭМС электрических подстанций с использованием 3D модели ПС и ВЛ [12]. Существующая версия программы

интегрирована в AutoCAD по технологии ObjectARX [13], что позволяет проектировщику проводить геометрическое моделирование стандартными средствами, а также визуализировать результаты расчетов, включая анимацию волновых процессов.

Моделирование волновых процессов.

При ударе молнии в опору ВЛ вблизи ПС происходит обратное перекрытие гирлянды изоляторов опоры и волна перенапряжения, распространяясь по фазному проводу, далее по шинам ПС, воздействует на изоляцию высоковольтного оборудования ПС (рис. 5). На расчетной модели оборудование ПС моделируется входными емкостями, выбранными согласно РД 153-34.3-35.125-99 (далее РД-99). Длина гирлянды изоляторов опоры ВЛ принята 1 м, вольт-секундная характеристика изоляторов также принята по РД-99. Удельное сопротивление грунта принято 200 Ом·м. При близком к ПС ударе молнии влиянием импульсной короны и потерями в земле можно пренебречь.

Рассмотрим напряжение на силовом трансформаторе. В первый момент времени

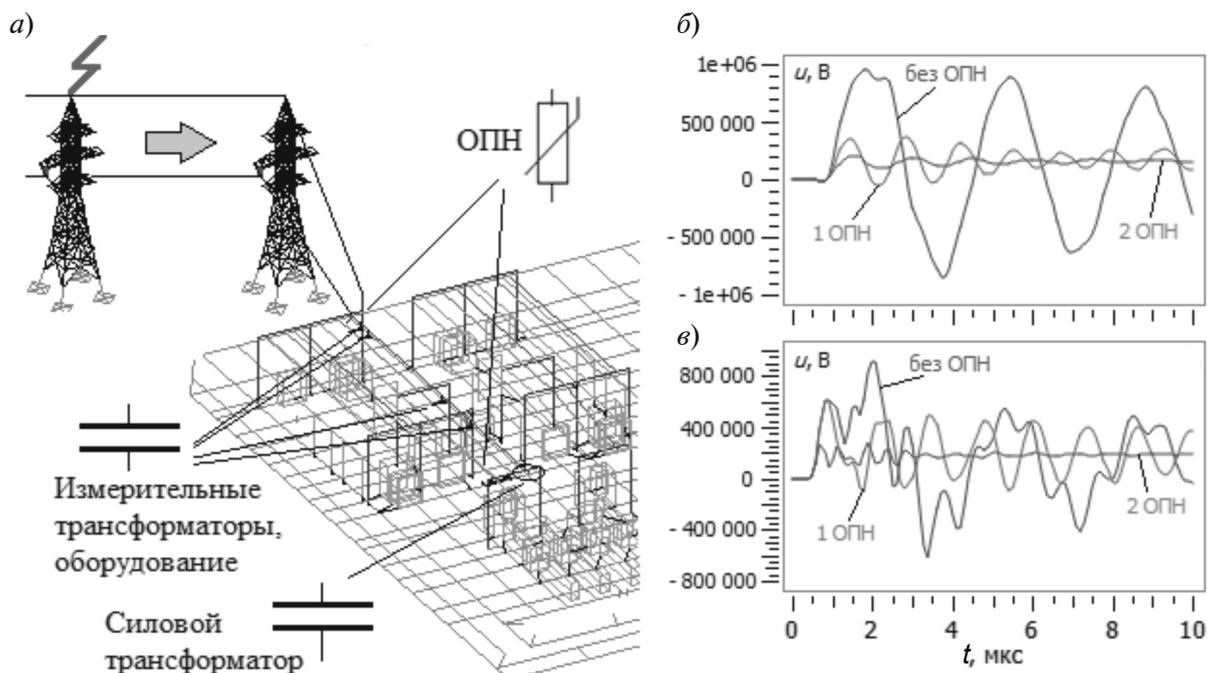


Рис. 5. Модель ПС и ВЛ (а); напряжение на силовом трансформаторе (б); напряжение на измерительном трансформаторе (в)

Fig. 5. Power substation and transmission line model (a); Voltage at power transformer (b); Voltage at measuring transformer (c)

емкость, которая моделирует трансформатор, разряжена, поэтому напряжение равно нулю, затем емкость заряжается, ее эквивалентное сопротивление резко возрастает, что приводит к удвоению напряжения падающей волны. В результате процесс отражения волны носит колебательный характер. Отраженная волна, возвращаясь к пораженной опоре, повторно отражается с изменением знака и вновь набегаем на ПС. Активное сопротивление проводов и шин достаточно мало, поэтому переходной процесс затухает медленно (рис. 5 б). Амплитуда напряжения на трансформаторе существенно превышает допустимое значение — 470 кВ для сети 110 кВ согласно РД-99.

Установка ОПН вблизи трансформатора существенно снижает амплитуду напряжения (рис. 5 б). Принято считать, что ОПН ограничивает перенапряжение до уровня его остающегося напряжения, но это справедливо только после затухания волновых процессов. В течение волнового процесса максимум напряжения на трансформаторе с учетом напряжения на заземлителе и проводниках от ОПН до заземлителя (спуске и опорной раме) может быть значительно выше (вдвое в данной задаче).

Таким образом, установка ОПН вблизи силового трансформатора ограничивает перенапряжение в рамках допустимого. Однако напряжение на измерительном транс-

форматоре в начале ОРУ, находящегося ближе к источнику тока и удаленного от ОПН, выше, чем на силовом трансформаторе, и превышает допустимое (рис. 5 в).

Надежность защиты электрооборудования можно повысить установкой второго ОПН, который следует размещать на ОРУ, на входе ВЛ [14], что подтверждается расчетами (рис. 5 б, в).

Выводы. Моделирование волновых процессов в задачах грозозащиты ПС, которое обычно проводится на схемных моделях (программа EMTP) или на сеточных моделях электромагнитных полей (программа FDTD), может быть выполнено с использованием гибридной (цепно-полевой) модели проводников, характерной для теории заземления (программа ЗУМ). Более того, гибридный подход имеет следующие достоинства: удобство ввода исходных данных — пользователь рисует 3D геометрическую модель реального объекта, а программа автоматически рассчитывает все параметры полевой и цепной модели, вместо упрощенной EMTP-схемы замещения с исходными данными, вводимыми вручную; общность решения — по единой геометрической модели ВЛ и ПС решается комплекс задач (грозозащиты, заземления, ЭМС, электробезопасности и электромагнитной экологии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов Б.В., Халилов Ф.Х., Новикова А.Н., Гумерова Н.И., Невретдинов Ю.М. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн, набегающих с воздушных линий // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 8. С. 7–25.
2. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В., Селиванов В.Н. Оптимизация схем замещения линий и подстанций для задач анализа показателей надежности грозозащиты подстанций // IV Межд. конф. по молниезащите. СПб., 2014. С. 171–182.
3. Gallagher T.J., Dudurych I.M. Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines // IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. 2004. Vol. 151. No. 1. Pp. 61–66.
4. Alvarado F.L., Lasseter R.H., Sanchez J.J. Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transient problems // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1983. Vol. PAS-102. No. 12. Pp. 3783–3790.
5. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Коровкин Н.В., Кулигин П.И., Монастырский А.Е., Титков В.В. Зависимость уровня перенапряжений ОПН разных классов напряжения от параметров заземляющих устройств. Эксперимент и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 5-13 (39). С. 29–38.
6. Куклин Д.В., Селиванов В.Н. Программное обеспечение для расчета волновых процессов в заземлителях и заземленных объектах // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 1. С. 137–142.
7. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Элек-

тричество. 2010. № 1. С. 16–23.

8. **Коровкин Н.В., Шишигин С.Л.** Расчетные методы в теории заземления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 1(166). С. 74–79.

9. **Хайрер Э., Ваннер Г.** Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999. 685 с.

10. **Вербжицкий В.М.** Основы численных методов. М.: Высш. шк., 2002. 840 с.

11. **Влах И., Сингхал К.** Машинные методы анализа и проектирования электронных схем.

Статья поступила в редакцию 15.03.2017

REFERENCES

1. **Yefimov B.V., Khalilov F.Kh., Novikova A.N., Gumerova N.I., Nevretdinov Yu.M.** Aktualnyye problemy zashchity vysokovoltного oborudovaniya podstantsiy ot grozovykh voln, nabegayushchikh s vozdukhnykh liniy [The actual problems of high-voltage substation equipment protection from lightning waves surged from power lines]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, No. 8, Pp. 7–25. (rus)

2. **Gumerova N.I., Yefimov B.V., Selivanov V.N.** Optimizatsiya skhem zameshcheniya liniy i podstantsiy dlya zadach analiza pokazateley nadezhnosti grozozashchity podstantsiy. [Optimization of equivalent circuit of transmission lines and electric substations for problems of analysis of electric substations lightning protection reliability parameters]. *IV Mezhd. konf. po molniyezashchite*. St. Petersburg, 2014, Pp. 171–182. (rus)

3. **Gallagher T.J., Dudurych I.M.** Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 2004, Vol. 151, No. 1, Pp. 61–66.

4. **Alvarado F.L., Lasseter R.H., Sanchez J.J.** Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transient problems. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1983, Vol. PAS-102, No. 12, Pp. 3783–3790.

5. **Adamyan Yu.E., Bocharov Yu.N., Krivosheyev S.I., Kolodkin I.S., Korovkin N.V., Kuligin P.I., Monastyrskiy A.Ye., Titkov V.V.** Zavisimost urovnya perenapryazheniy OPN raznykh klassov napryazheniya ot parametrov zamezlyayushchikh ustroystv. Eksperiment i modelirovaniye [Dependence of overvoltage arrester voltage class on the parameters of the grounding device. Experiment and simulation]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016, No. 5-13 (39), Pp. 29–38. (rus)

6. **Kuklin D.V., Selivanov V.N.** Programmnoye

М.: Радио и связь, 1988. 560 с.

12. **Шишигин Д.С.** К выбору технологии интеграции прикладного программного обеспечения с САПР // Труды СПИИРАН. 2016. № 4(47). С. 211–224.

13. **Шишигин Д.С.** AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики // Автоматизация в промышленности. 2014. № 9. С. 28–32.

14. **Гумерова Н.И., Ефимов Б.В., Малочка М.В.** Уточнение рекомендаций по защите высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 3 (22). С. 5–10.

obespecheniye dlya rascheta volnovykh protsessov v zamezlyayushchikh i zamezlyayemykh ob'yektakh [Software for calculations of surge processes in ground conductors and grounded objects]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 18, No. 1, Pp. 137–142. (rus)

7. **Shishigin S.L.** Matematicheskiye modeli i metody rascheta zamezlyayushchikh ustroystv. [Mathematical models and methods for grounding devices calculation]. *Elektrichestvo*, 2010, No. 1, Pp. 16–23. (rus)

8. **Korovkin N.V., Shishigin S.L.** Raschetnyye metody v teorii zamezleniya [Calculation methods in the grounding theory]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, 2013, No. 1(166), Pp. 74–79. (rus)

9. **Khayrer E., Vanner G.** Resheniye obyknovennykh differentsialnykh uravneniy. Zhestkiye i differentsialno-algebraicheskiye zadachi [Solving ordinary differential equations. Stiff and differential-algebraic problems]. Moscow: Mir Publ., 1999, 685 p. (rus)

10. **Verzhitskiy V.M.** Osnovy chislennykh metodov [Basics of numerical methods]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2002, 840 p. (rus)

11. **Vlakh I., Singkhal K.** Mashinnyye metody analiza i proyektirovaniya elektronnykh skhem [Computer methods for circuit analysis and design]. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1988, 560 p. (rus)

12. **Shishigin D.S.** K vyboru tekhnologii integratsii prikladnogo programmnoye obespecheniya s SAPR [On choosing the technology of application software integration with a CAD-system]. *Trudy SPIIRAN*, 2016, No. 4(47), Pp. 211–224. (rus)

13. **Shishigin D.S.** AUTOCAD prilozheniye dlya rascheta molniyezashchity i zamezleniya ob'yektov elektroenergetiki [AutoCAD application for lightning

protection and grounding calculation at power industry objects]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2014, No. 9, Pp. 28–32. (rus)

14. **Gumerova N.I., Yefimov B.V., Malochka M.V.** Utochneniye rekomendatsiy po zashchite

vysokovoltного oborudovaniya podstantsiy ot grozovykh voln [Update recommendations for protection of high voltage equipment from lightning waves]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, No. 3 (22), Pp. 5–10. (rus)

Received 15.03.2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ШИШИГИН Дмитрий Сергеевич

SHISHIGIN Dmitry S.

E-mail: shishigind@yandex.ru

ШИШИГИН Сергей Леонидович

SHISHIGIN Sergey L.

E-mail: ctod28@yandex.ru