

Д.С. Шишигин, С.Л. Шишигин, И.Н. Смирнов

РАСЧЕТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ В ЦЕПНЫХ СХЕМАХ

Введение

Удары молнии вызывают в воздушной линии (ВЛ) волны перенапряжений, распространение которых представляет опасность для электрооборудования электрических подстанций (ПС) [1-4].

Для выбора средств защиты от перенапряжений производится численное моделирование волновых процессов ВЛ и ПС. Стандартный подход основан на теории длинных линий с использованием программы АТР-ЕМТР. Достоинства этого подхода и программы хорошо известны, к недостаткам относятся трудности с моделированием заземлителей и импульсной короны проводов ВЛ.

Активное сопротивление как стандартная модель заземлителя в ЕМТР адекватна только для низкоомного грунта. Импульсное сопротивление заземлителя в высокоомном грунте существенно зависит от частоты и тока молнии (из-за ионизации грунта), что существенно влияет на перекрытие изоляции опоры и работу ОПН.

Импульсная корона, приводящая к затуханию и деформации фронта волны перенапряжения, моделируется динамической емкостью [5-8]. Для учета распределенного характера короны следует (вручную в АТР) подробить ВЛ на элементы малой длины (10-30 м), что трудоемко. Но главная проблема в том, что скачкообразная коммутация емкости приводит к численной осцилляции и неустойчивости решения по формуле трапеций, которая используется в ЕМТР [9].

Мы развиваем альтернативный подход моделирования грозовых перенапряжений с использованием цепных схем, которые с успехом используются в теории заземлителей [10]. При большом числе звеньев цепные схемы позволяют моделировать волновые процессы с достаточной точностью. Описать этот подход для моделирования волновых процессов ВЛ с учетом импульсной короны и затухания в земле – **цель** настоящей работы.

1. Цепная модель тонкого проводника

Проводники (заземляющие стержни, провода ВЛ, шины ПС) дробятся на элементы длиной $l < \lambda/10$, где λ – длина электромагнитной волны. Каждому элементу ставится в соответствие П–схема с продольным сопротивлением Z , включающим внутреннее и внешнее индуктивное сопротивление проводника, и поперечной проводимостью Y , моделирующей растекание тока в земле или емкостные токи проводников в воздухе

(рис.1). Взаимные электромагнитные связи между П–схемами учитываются взаимными сопротивлениями и проводимостями. Параметры цепной модели проводника (рис.1) приведены в [10].

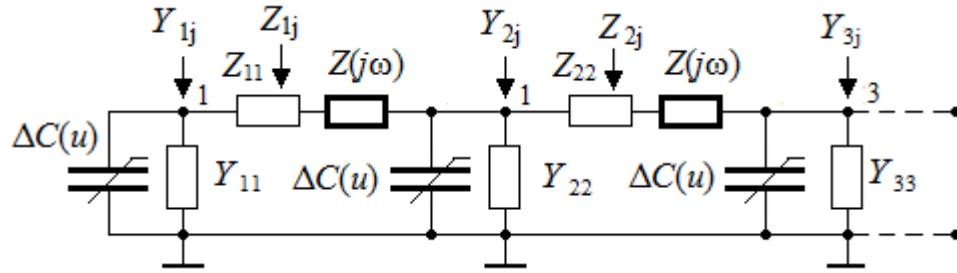


Рис.1. Цепная модель тонкого проводника (с учетом сопротивления земли и импульсной короны проводов ВЛ)

Для моделирования затухания волн в земле в продольные ветви включается сопротивление земли $Z(j\omega)$ [11]. Для моделирования импульсной короны в поперечные ветви включается нелинейная емкость [9]

$$\Delta C(u) = C_d(u) - C_0,$$

где C_0 – геометрическая емкость провода, $C_d(u)$ – динамическая емкость импульсной короны.

2. Сопротивление земли в качестве обратного провода ВЛ

Земля играет роль обратного провода ВЛ, сопротивление которой рассчитывается по формуле Карсона. М.В. Костенко (путем использования мажорирующей функции) вычислил интеграл Карсона, что позволило установить его физический смысл [12]. Плоскость нулевого потенциала, которая для идеально проводящей земли совпадает с ее поверхностью, в реальной земле (с удельной проводимостью σ) смещается на глубину

$$\Delta h(j\omega) = \frac{1}{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma}},$$

где p – коэффициент распространения плоской электромагнитной волны в проводящей среде, отсюда Δh – толщина скин-слоя (комплексная величина).

Тогда, для вычисления внешней индуктивности провода можно применить метод зеркальных изображений, увеличив высоту подвеса провода на величину Δh

$$L(j\omega) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h + \Delta h(j\omega))}{R} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{\Delta h(j\omega)}{h} \right) \text{ [Гн/м]},$$

где h – высота подвеса провода, R – радиус провода.

Погонное сопротивление петли провод-земля

$$Z(j\omega) = Z_{\text{внут}} + Z_{\text{внеш}} + Z_{\text{зем}} = Z_{\text{внут}} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{\Delta h(j\omega)}{h} \right) \text{ [Ом/м]},$$

где $Z_{\text{внут}}$ – внутреннее сопротивление провода, $Z_{\text{внеш}}$ – внешнее индуктивное сопротивление провода для идеально проводящей земли, $Z_{\text{зем}}$ – сопротивление земли (обратного провода ВЛ).

Взаимное сопротивление петли “два провода – земля” находится аналогично, также увеличив в известной формуле высоту подвеса проводов на Δh .

Таким образом, сопротивление земли по М.В. Костенко определяется проще, чем по Карсону, при высокой степени совпадения с оригиналом (погрешность 3%) [11].

Работа [12], к сожалению, малоизвестна. Значительно позже формула М.В. Костенко была открыта заново иностранными исследователями: С. Dubanton (1969 г.), С. Gary (1976 г.), А. Deri (1981 г.).

Модификация формулы М.В. Костенко в высокоомном грунте с частотно-зависимыми параметрами выполнена в работе [11].

3. Динамическая емкость импульсной короны

Коронный разряд на проводах ВЛ возникает, когда напряженность электрического поля провода превысит критическую напряженность [5]

$$E_0 = 23.3m\delta \left(1 + \frac{0.62}{\delta^{0.3} r_0^{0.38}} \right) \text{ [кВ/см]},$$

где r_0 – радиус провода [см], δ – относительная плотность воздуха (далее $\delta=1$), m – коэффициент негладкости провода (далее $m=0.82$).

До возникновения коронного разряда емкостной ток пропорционален статической (геометрической) емкости провода

$$i = \frac{dq}{dt} = C_0 \frac{du}{dt}.$$

При коронном разряде заряд провода (включая объемный заряд короны) нелинейно зависит от напряжения, тогда

$$i = \frac{dq(u)}{dt} = \frac{dq(u)}{du} \frac{du}{dt} = C_d \frac{du}{dt}.$$

Таким образом, форма записи стекающего тока провода не изменятся при коронном разряде, если геометрическую емкость провода заменить динамической емкостью

$$C_d = \frac{dq(u)}{du}.$$

Рассмотрим четыре модели динамической емкости короны, первая из которых получена теоретически, остальные – экспериментально.

1. Модель Разевига [5, стр.237].

Примем, что чехол короны представляет цилиндрический проводник радиуса r .

Тогда

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon r}, q = 2\pi\epsilon Er, u = Er \ln(2h/r),$$

где q – погонный заряд провода (включая объемный заряд короны), h – высота подвеса провода.

Динамическая емкость (в предположении, что средняя напряженность чехла $E = \text{const}$)

$$C_d = \frac{dq}{du} = \frac{d}{d} \frac{2\pi\epsilon Er}{Er \ln(2h/r)} = \frac{\frac{d}{dr} 2\pi\epsilon Er}{\frac{d}{dr} Er \ln(2h/r)} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(2h/r) - 1} = C_0 \frac{\ln(2h/r_0)}{\ln(2h/r) - 1}, \quad (1)$$

где r – радиус чехла определен при заданном напряжении провода u и заданной напряженности E , из условия

$$u = Er \ln(2h/r).$$

Таким образом, теоретически показано, что в момент возникновения коронного разряда (при $r=r_0$) динамическая емкость (1) возрастает скачком.

2. Модель ЛПИ [6].

Динамическая емкость провода

$$C_d(u) = C_0 + C_0 \cdot 5/3 \cdot k(u/U_0 - 1)^{2/3}, k_- = 0.375, k_+ = 0.78, \quad (2)$$

где C_0 – геометрическая емкость провода, k – коэффициенты для положительного и отрицательного импульса. Заметим, что $C_d = C_0$ при $u = U_0$, что противоречит (1).

3. Модель ВНИИЭ [7]

$$C_d(u) = 4/3 \cdot C_0 \cdot B \cdot \sqrt[3]{u/U_0}, B_+ = 1.02, B_- = 0.85. \quad (3)$$

В момент возникновения коронного разряда, при $u = U_0$, емкость короны возрастает скачком, что согласуется с (1).

4. Модель Гари [8]

$$C_d(u) = C_0 B (u/U_0)^{B-1}, B_+ = 2.63d^{0.153}, B_- = 1.121 + 3.4d, \quad (4)$$

где d – диаметр провода. В момент возникновения коронного разряда динамическая емкость возрастает скачком, что согласуется с (1) и (3). В данной модели динамическая емкость зависит от диаметра провода.

4. Расчет импульсных процессов методом дискретных схем

Расчет цепной схемы (рис.1) производится во временной области методом дискретных схем (этот метод используется и в ЕМТР).

Найдем дискретную схему емкости. Выполним интегрирование дифференциального уравнения, связывающего напряжение и ток, на k -м временном шаге длиной h по формуле трапеций

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow \frac{i_{k+1} + i_k}{2} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} \Rightarrow i_{k+1} = \frac{2C}{h} u_{k+1} - \left(i_k + \frac{2C}{h} u_k \right) = Gu_{k+1} - J_k, \quad (5)$$

по неявной формуле Эйлера

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow i_{k+1} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} = \frac{C}{h} u_{k+1} - \frac{C}{h} u_k = Gu_{k+1} - J_k. \quad (6)$$

Этим уравнениям соответствует дискретная схема (рис.2).

Дискретная схема индуктивности получается аналогично. Дискретные схемы произвольного частотно-зависимого сопротивления и проводимости получены в [10].

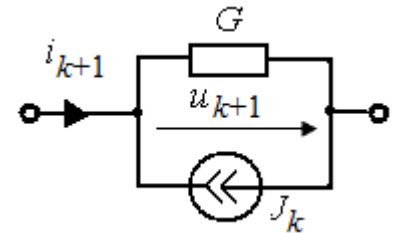


Рис.2. Дискретная схема емкости на k -м временном шаге

Таким образом, расчет переходного процесса в цепных схемах (рис.1) сводится к расчету резистивной цепи на последовательности временных шагов. Проблема в том, что формула трапеций не является L-устойчивой [13] – при определенных условиях она приводит к численным осцилляциям, что можно показать на примере.

Пусть к емкости C приложено импульсное напряжение с линейным фронтом длительностью T и единичной амплитудой. Примем шаг $h=T$, тогда напряжение шагов $u_0=0, u_1=u_2=..u_n=1$.

Найдем ток емкости по формуле трапеций (5) при $C/h=1$

$$\begin{aligned} i_0 &= 0, \\ i_1 &= 2C / h \cdot u_1 = 2, \\ i_2 &= 2C / h \cdot u_2 - (i_1 + 2C / h \cdot u_1) = -2, \\ &\dots \\ i_{n+1} &= -i_n. \end{aligned}$$

Таким образом, ток осциллирующий $i=(0,2,-2,2,-2\dots)$, при численных расчетах такое решение разваливается. При использовании (6) решение устойчиво.

Проблема устойчивости возникает при моделировании коронного разряда. При скачкообразном изменении динамической емкости формула трапеций приводит к численной осцилляции и неустойчивости решения. Для ослабления осцилляций в ЕМТР рекомендуется применение линейной комбинации формулы трапеций и неявной формулы Эйлера, которая L-устойчива [13], в соотношении 0.85/0.15. Исследование этого способа показало, что он эффективен для моделирования статических емкостей, но не гарантирует устойчивое решение при моделировании динамической емкости.

Простое, устойчивое и достаточно точное решение дает следующая методика: формула трапеций используется для моделирования индуктивностей и емкостей с постоянными параметрами, для моделирования переменной части динамической емкости $\Delta C = C_d - C_0$ используется неявная формула Эйлера.

5. Модальный метод расчета волновых процессов ВЛ с импульсной короной

Волновые процессы в многопроводных ВЛ рассчитываются модальным методом, идея которого заключается в преобразованиях уравнений n -проводной длинной линии к системе из n -уравнений однопроводных, независимых друг от друга линий, иначе, из общего волнового процесса выделяются независимые модальные (волновые) каналы [4].

Пример. В крайний провод трехпроводной ВЛ (с горизонтальным расположением проводов) вводится импульс тока 1 А, два другие провода изолированы. Вектор фазных токов $I = (1, 0, 0)^T$. Применение модального метода приводит к матрице токов волновых каналов (с округлением результатов для наглядности)

$$I_w = \begin{pmatrix} 1/3 & 0.5 & 1/6 \\ 1/3 & 0 & -1/3 \\ 1/3 & -0.5 & 1/6 \end{pmatrix}.$$

Первый столбец определяет волновой канал «провода-земля», поскольку токи всех проводов, равные 1/3 А, движутся в прямом направлении по проводам и возвращаются через землю. Затухание и деформация волны земляного канала определяется сопротивлением земли, методика расчета которого с помощью эквивалентных схем рассмотрена в [4], в шаговых алгоритмах – в [11].

Второй столбец определяет волновой канал «крайний провод-крайний провод», третий столбец – «крайние провода – средний провод». Токи этих каналов замыкаются по проводам (без возврата через землю), что соответствует распространению волны в воздухе, т.е. с очень малым затуханием и запаздыванием (из-за потерь в проводах), которыми в рассматриваемых далее задачах можно пренебречь. Это позволяет объединить волновые каналы в воздухе (независимо от числа проводов), что упрощает расчеты. В результате рассматриваем волновой канал в земле I_{gr} и волновой канал в воздухе I_{air} , где

$$I_{gr} = (1/3, 1/3, 1/3)^T, I_{air} = I - I_{gr} = (2/3, -1/3, -1/3)^T.$$

Модальный метод, основанный на принципе наложения, применим только в линейных задачах. Для этого нелинейная характеристика динамической емкости аппроксимируется кусочно-постоянной функцией, т.е. задача становится линейной на каждом временном шаге. В дискретные моменты времени, в узлы схемы подключается

сосредоточенная емкость, величина которой определяется напряжением в данный момент времени.

6. Сравнение результатов расчета с ЕМТР и измерениями на реальных ВЛ

Расчеты волновых процессов ВЛ выполнены в программе ZYM [10].

Задача 1. В крайний провод трехпроводной ВЛ (рис.3) вводится импульс тока 100 А с фронтом 0.1 мкс. Два другие провода изолированы. Удельное сопротивление грунта $\rho=10000$ Ом·м. Частотные свойства высокоомного грунта для сравнения с расчетами в программе АТР-ЕМТР не учитываем.

Напряжения проводов на расстоянии 3 км, найденные в данной работе, совпадают с результатами, полученными в программе АТР-ЕМТР (рис.3). Запаздывание и затухание волнового канала «все провода - земля» приводит к известным эффектам деформации фронта волны в первом проводе и отрицательным «выбросам» на других проводах.

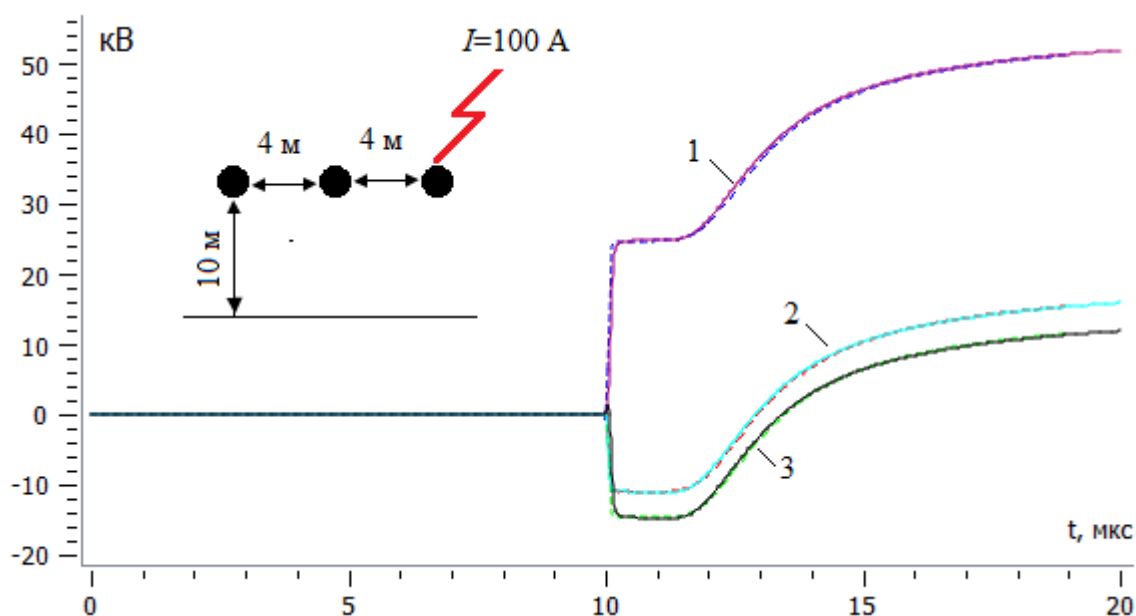


Рис.3. Напряжение на расстоянии 3 км от начала ВЛ: 1– крайний провод, 2– средний провод, 3– дальний провод; сплошной график – расчет по программе ZYM, пунктирный график – расчет по АТР-ЕМТР; радиус проводов 1 см

Задача 2. В экспериментах Гари (С.Gary) [1] в начало крайнего провода ВЛ (рис.4) вводится импульс положительного напряжения

$$u(t) = U_m \left[0.988e^{-0.123t} - 1.064e^{-4.1t} \sin(12.3t + 70^\circ) \right], \text{ где } U_m = 850 \cdot 10^3, t [\mu\text{с}]$$

и получены осциллограммы напряжения на расстоянии 1, 3, 7, 10 км. Наши расчеты хорошо согласуются с данными измерений (рис.4).

По результатам расчета на расстоянии 3 км (рис. 5a) и 10 км (рис.5b) видим, что модель ВНИИЭ наиболее точная, модель Гари (из-за результата на 3 км) и модель ЛПИ

менее точны. Наши расчеты (по всем моделям короны) согласуются с экспериментом не хуже, чем расчеты по программе EMTP-RV (рис.5б).

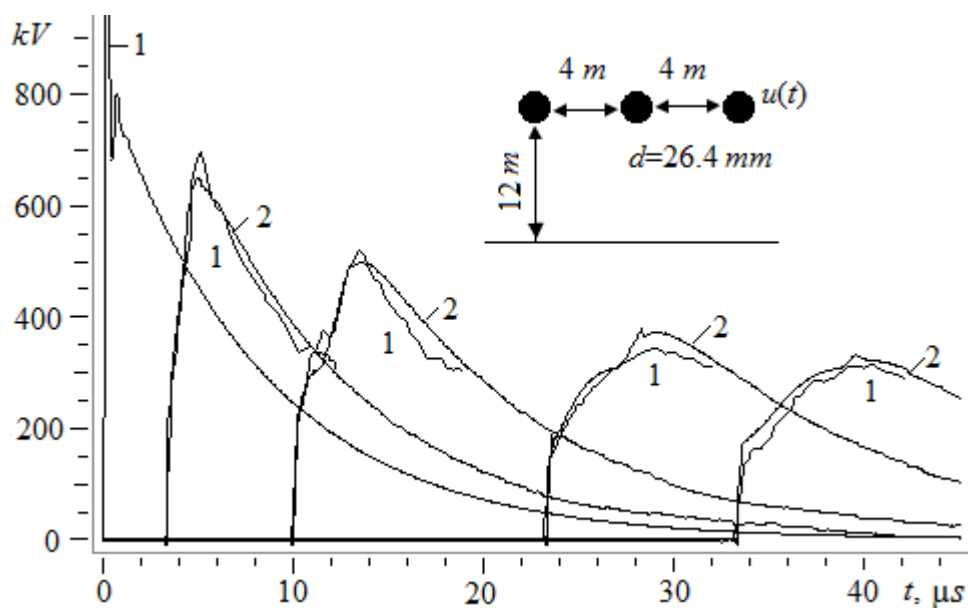


Рис.4. Напряжение на расстоянии 0, 1,3,7, 10 км от начала ВЛ: 1– измерения Гари (из документации к программе EMTP-RV), 2– расчет с моделью короны ВНИИЭ (3), $\rho=200$ Ом·м

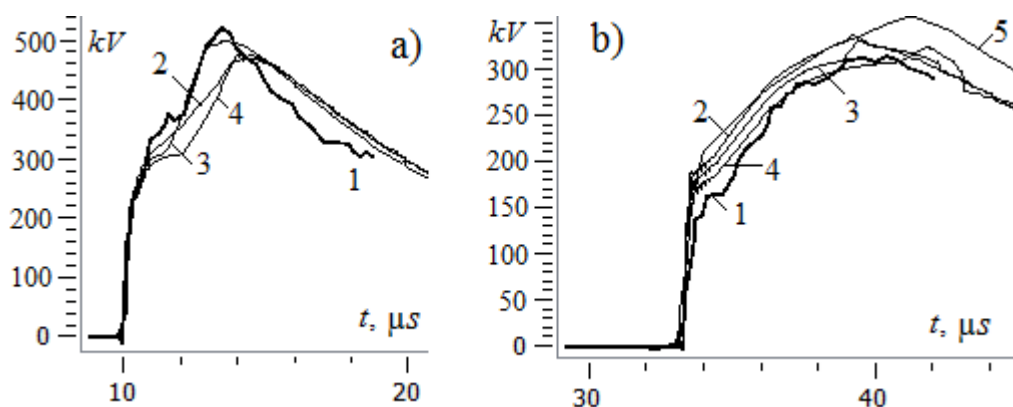


Рис.5. Напряжение на расстоянии 3 км (а), 10 км (б) от начала ВЛ: 1– измерения Гари, 2– расчет с моделью короны ЛПИ (2); 3– расчет с моделью короны ВНИИЭ (3); 4– расчет с моделью короны Гари (4); 5– расчет по программе EMTP-RV (из документации к этой программе)

Задача 3. В экспериментах Вагнера (Wagner C.F.) [2] в начало крайнего провода трехпроводной ВЛ вводятся различные по амплитуде и полярности импульсы напряжения (рис.6). Сравним напряжение, измеренное на расстоянии 2222 м, с результатами расчетов (рис.6). Модель ВНИИЭ и модель Гари одинаково точны при отрицательной полярности, но модель ВНИИЭ точнее при положительной полярности. Модель ЛПИ здесь наименее точная, динамическая емкость при малых напряжениях недостаточна, при больших напряжениях избыточна. Были рассмотрены и другие варианты [2], которые приводят к аналогичным выводам.

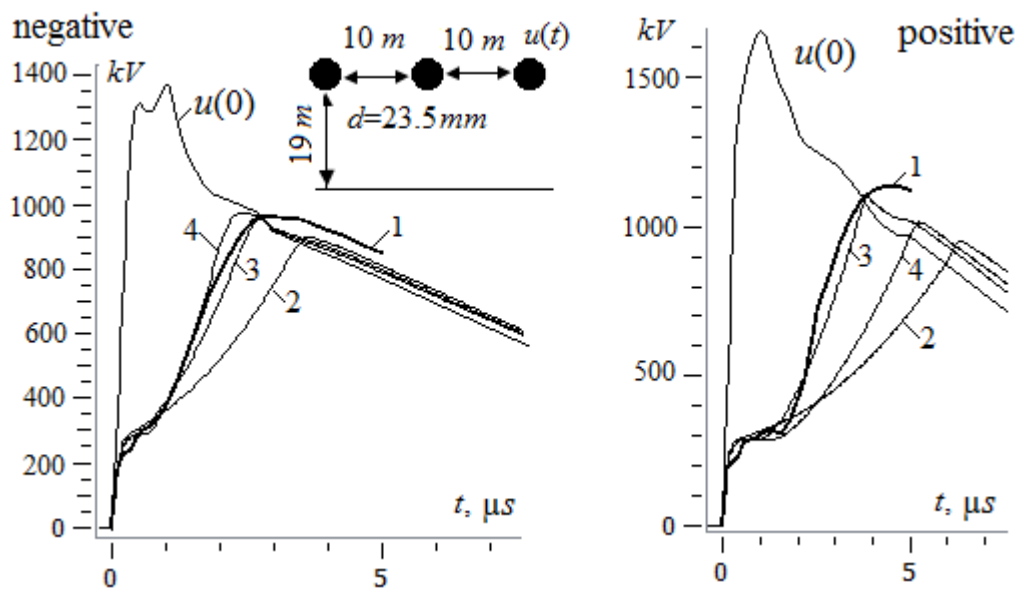


Рис.6. Напряжение в начале линии $u(0)$ и на расстоянии 2222 м (7290' в оригинале) при отрицательной и положительной полярности: 1– измерения Вагнера, 2– расчет с моделью короны ЛПИ (2); 3– расчет с моделью короны ВНИИЭ (3); 4– расчет с моделью короны Гари (4); удельное сопротивление грунта $\rho=50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Задача 4. В экспериментах Потужного и Фертика [3] в начало крайнего провода ВЛ вводятся импульсы напряжения разной полярности и амплитуды (рис.7). Сравним результаты измерений и расчетов на расстоянии 5.52 км (рис.7). При отрицательной полярности импульса наилучшее совпадение с измерениями дают расчеты с моделью Гари, но расчеты с моделью ВНИИЭ также хорошо согласуются с измерениями. Расчеты с моделью ЛПИ наименее точные. При положительной полярности импульса расчеты при всех моделях короны хорошо описывают затухание волны, но не позволяют моделировать запаздывание фронта волны с достаточной точностью (рис.7), поэтому здесь сравнение моделей затруднительно.

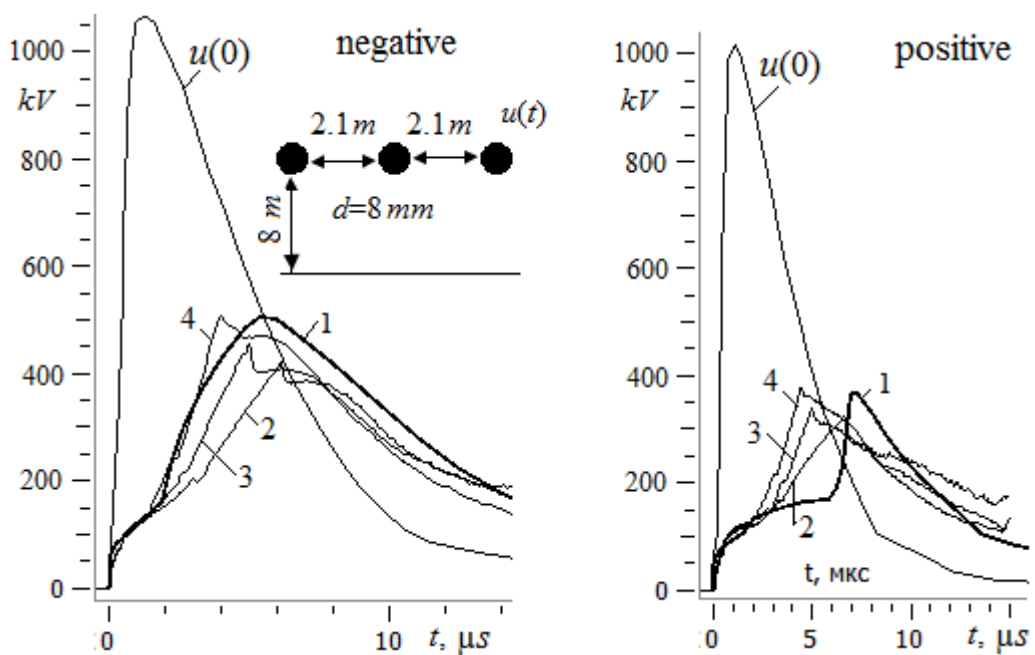


Рис.7. Напряжения в начале линии $u(0)$ и на расстоянии 5.52 км: 1– измерения Потужного и Фертика, 2– расчет с моделью короны ЛПИ (2); 3– расчет с моделью короны ВНИИЭ (3); 4– расчет с моделью короны Гари (4); удельное сопротивление грунта $\rho=200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Выводы

Моделирование грозowych перенапряжений ВЛ с импульсной короной требует дробления проводов на элементы малой длины (10-30 м) так, что цепные схемы с сосредоточенными параметрами конкурентоспособны по сравнению с моделью длинной линии.

Расчеты волновых процессов в реальных ВЛ с использованием трех наиболее распространенных моделей короны, при сравнении с экспериментальными данными показали, что модель ВНИИЭ (3) является наиболее адекватной. Более сложная модель Гари (4) дает избыточную динамическую емкость при положительной полярности. Модель ЛПИ (2) не учитывает эффект скачка динамической емкости при возникновении короны, из-за чего динамическая емкость занижена при малых напряжениях короны и поэтому не возникает характерной «ступеньки» в графике волны напряжения. При больших напряжениях динамическая емкость в модели ЛПИ завышена по сравнению с моделью ВНИИЭ.

Скачкообразное изменение динамической емкости является источником численных осцилляций и нарушения устойчивости расчета волновых процессов по формуле трапеций в программах типа ЕМТР. Рекомендуется выделять переменную составляющую динамической емкости $\Delta C = C_d - C_0$ и моделировать ее по неявной формуле Эйлера, что обеспечивает устойчивое решение при достаточной точности расчетов.

Список литературы

1. Gary C., Timotin A., Cristescu D. Prediction of surge propagation influenced by corona and skin effect. IEE Proc., Vol. 130, Pt. A, No. 5, 1983, pp. 264-272.
2. Wagner C.F.; Gross I.W., Lloyd B.L. High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 73, Issue 2, 1954, pp. 196-209.
3. Потужный А.К., Фертик С.М. Затухание волн высокого напряжения в 35-kV линии // Электричество. 1938. № 1. С. 29 – 39.
4. Ефимов Б. В., Гумерова Н. И. Моделирование деформации грозowych волн в воздушных линиях с учетом совместного влияния конструкции опор, короны на проводах и потерь в земле // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. Вып. 7(17). С. 13–32.
5. Техника высоких напряжений / Под ред. Д. В. Разевига, М., «Энергия», 1976. 488 с.
6. Богатенков Н.М., Гумерова Н.И., Костенко М.В. и др. Вольт-кулоновые характеристики короны на расщепленных проводах при импульсном напряжении / Труды ЛПИ, Электроэнергетика, № 340, 1974, С. 8-13.

7. Бочковский Б.Б. Импульсная корона на одиночных и расщепленных проводах // Электричество. 1966. № 7. С. 22 – 27.
8. Gary C., Dragan G., Langu I., Impulse corona discharge energy around the conductors. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct 1990, pp. 922–924.
9. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет грозовых перенапряжений воздушных линий с импульсной короной в цепных схемах // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 1. С. 47-56.
10. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С. Расчет заземлителей (монография).– Вологда: ВоГУ, 2020. – 219 с.
11. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет грозовых перенапряжений воздушных линий в цепных схемах с учетом частотных свойств грунта // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 4. С. 87–99.
12. Костенко М.В. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. 1955. № 10. С. 29-34.
13. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи – Москва : Мир, 1999. – 685 с.