

## 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРОВОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

### Введение

При ударе молнии в грозозащитный трос, опору воздушной линии (ВЛ) с перекрытием изоляции или прорыве молнии на провода возникают волны перенапряжения, представляющие опасность для изоляции электрооборудования электрических подстанций (ПС) [1].

Решение задач грозозащиты наиболее часто проводится на основе теории длинных линий в программе ЕМТР. Достоинства этого подхода известны. К недостаткам относится слишком упрощенная модель заземлителя – активное сопротивление, измеренное на низкой частоте (или взятое из нормативных документов). Электрооборудование ПС моделируется емкостями, которые измеряются относительно заземлителя ПС, но в расчетной модели подключаются к удаленной земле. С учетом частотных свойств удельной проводимости и диэлектрической проницаемости грунта [2] простейшие модели заземлителя становятся все менее адекватными, особенно в высокоомном грунте.

Переход к единым 3D моделям проводников ПС и ВЛ в земле и воздухе, позволяющим моделировать волновые процессы в проводах и шинах совместно с процессами растекания тока в заземлителях, повышает адекватность расчетов. Такую возможность дают методы теории электромагнитного поля с программой FDTD, но для сложных, протяженных 3D систем тонких проводников ВЛ и ПС этот подход слишком трудоемок.

Проводник в воздухе является частным случаем проводника в земле (с нулевой проводимостью растекания). Отсюда возможность применения хорошо разработанных цепно-полевых моделей, методов и компьютерных программ расчета заземлителей [3-5] в задачах грозозащиты.

Расчет грозовых перенапряжений ВЛ и ПС в 3D модели проводников в воздухе и земле на основе теории заземлителей является **целью работы**.

### 1. Цепно-полевая модель заземлителя

Расчет заземлителя – цепно-полевая задача, поскольку сопротивление, токи, напряжения проводников (цепные параметры) требуется рассчитать совместно с интегральными и дифференциальными параметрами электромагнитного поля. Для решения этой задачи используется цепно-полевая модель заземлителя (рис. 1) [3].

Заземлитель дробится на элементы длиной  $l < \lambda/10$ , где  $\lambda$  – длина электромагнитной волны. Элементы описываются вектором внутренних сопротивлений  $Z$ , матрицами собственной и взаимной индуктивности  $M$ , проводимости  $G$ , емкости  $C$  (матрицы  $G$ ,  $C$  определяются в средних точках элементов полевой модели, затем переносятся в узлы цепной модели). Проектировщику достаточно нарисовать стержни (что легко сделать в AutoCAD), а расчет всех параметров модели (рис.1) производится автоматически.

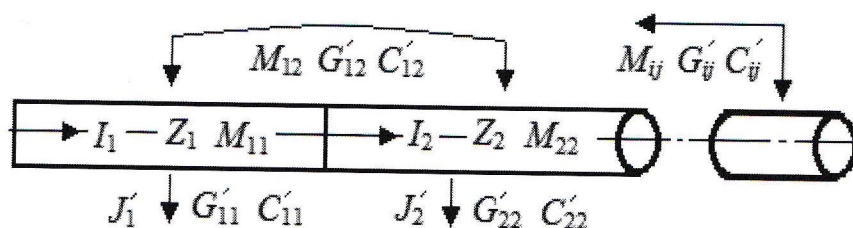


Рис. 1а. Полевая модель тонкого проводника

Как изменится модель для проводов ВЛ. Длина элемента, выбранная из условия  $l < \lambda/10$ , в воздухе больше, чем в грунте, что облегчает расчеты. Сопротивление обратного земляного провода ВЛ суммируется с собственным сопротивлением проводника  $Z$ , также зависящим от частоты с учетом поверхностного эффекта. Импульсная корона проводов ВЛ моделируется динамической емкостью  $C_d(u)$ , которая включается в узлы вместо геометрической емкости провода  $C$ .

Таким образом, модель заземлителя (рис.1) применима для проводников, расположенных как в земле, так и в воздухе.

## 2. Методы расчета импульсных процессов во временной области

**Метод дискретных схем (МДС)** – численный метод расчета переходных процессов во временной области (используется в программе ЕМТР). Интегрирование дифференциальных уравнений индуктивности и емкости по формуле трапеций

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

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

приводит к резистивным схемам (рис. 2)

Расчеты резистивных цепей производятся с высоким быстродействием, поскольку сводятся к операциям с действительными числами, а матрицы сопротивлений и проводимостей при  $h = \text{const}$  вычисляются (и обращаются) один раз. Однако в жестких задачах, характерных для молниезащиты, применение формулы трапеций вызывает осцилляции, причины которых раскрыты в [6].

Формула трапеций А-устойчива, т.е.  $|R(z)| \leq 1$  при  $z < 0$ , но не удовлетворяет требованию L-устойчивости [6]

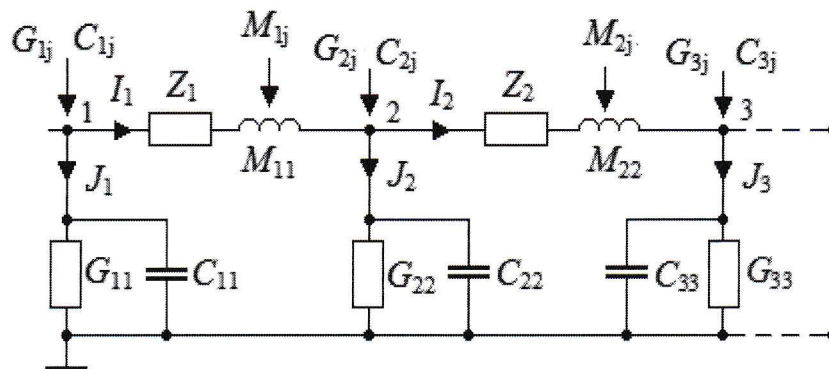


Рис. 16. Цепная модель тонкого проводника

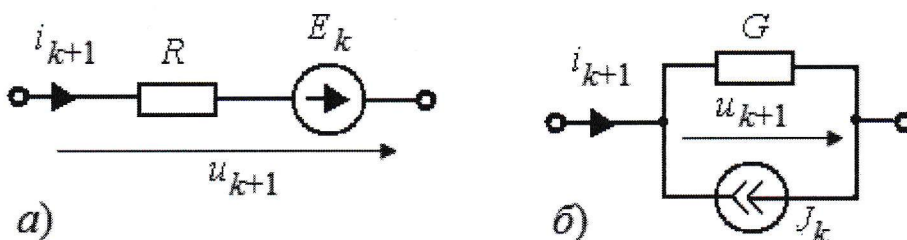


Рис. 2. Дискретная модель индуктивности (а) и емкости (б) на  $k$ -временном шаге

$$\lim_{z \rightarrow \infty} R(z) = 0,$$

где  $R(z)$  – функция устойчивости.

Последствия покажем на примере тестового дифференциального уравнения  $x' = \lambda x$ , решение которого по формуле трапеций сводится к шаговому алгоритму

$$x_{k+1} = R(z)x_k, \quad R(z) = \frac{1 - z/2}{1 + z/2}, \quad z = \lambda h,$$

где  $k$  – номер шага. Последовательность  $x_k$  знакопеременная при  $|z| > 2$ ,  $R(z) < 0$ , т.е. в задаче с апериодическим решением возникает колебательный процесс, в пределе незатухающий:  $x_{k+1} = -x_k$  при  $R(z) = -1$ .

Таким образом, есть вероятность возникновения ложных высокочастотных колебаний при использовании формулы трапеций в жестких задачах (рис. 3а).

Для исключения осцилляций (в руководстве к программе ЕМТР) рекомендуется включать дополнительную проводимость параллельно индуктивности и сопротивление последовательно емкости, однако эти меры не позволяют устранить осцилляции полностью [4]. Действенным средством является уменьшение временного шага (рис. 3б) и длины элемента (по сравнению со стандартным значением  $l < \lambda/10$ ), что не всегда возможно.

**Метод Влаха** [7] – численный вариант операторного метода. Практический интерес представляет шаговый алгоритм с формулой 3 порядка [3,4].

Операторные схемы замещения индуктивности и емкости полностью совпадают с дискретными схемами в МДС (рис. 2) при  $R = sL$ ,  $E_k = Li_k$ ,  $G = sC$ ,  $J_k = Cu_k$ , где  $s = (2 + \sqrt{2}j) / h$ . На каждом  $k$ -шаге производится расчет операторной (фактически комплексной) схемы, а для возврата к оригиналам используется формула [7]

$$f(t) = \text{Re} \left[ (5\sqrt{2}j - 2) \cdot F(s) \right] / h.$$

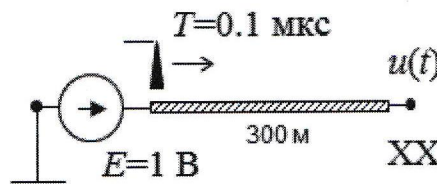
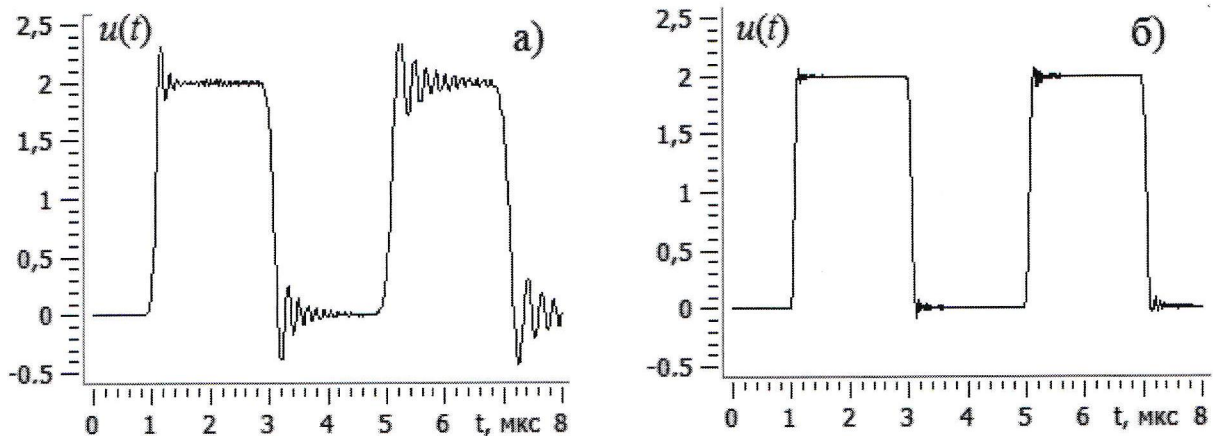


Рис. 3. Напряжение в конце линии без потерь длиной 300 м при воздействии импульса напряжения амплитудой 1 В с линейным фронтом длительностью 0,1 мкс, рассчитанное по МДС с формулой трапеций с шагом: а)  $h=20$  нс, б)  $h=4$  нс

Формула Влаха 3 порядка обладает двумя существенными преимуществами перед формулой трапеций: она на порядок точнее и является L-устойчивой, что позволяет применять ее без излишних ограничений в жестких задачах. К недостаткам относится обычно вдвое большая трудоемкость расчета переходных процессов, вызванная операциями с комплексными числами. МДС и метод Влаха дополняют друг друга, поэтому их совместная реализация расширяет возможности компьютерной программы.

### 3. Модели частотно зависимых и нелинейных элементов во временной области

**Моделирование частотно зависимых элементов** – сопротивлений  $z(j\omega)$  и проводимостей  $y(j\omega)$  всегда вызывало трудности во временной области. Расчет на эквивалентной частоте тока молнии прост, но неточен. Замена  $z(j\omega)$  схемой замещения с близкими частотными характеристиками не обладает общностью и существенно увеличивает трудоемкость расчета. Эффективный метод моделирования частотных сопротивлений  $z(j\omega)$  дискретными схемами (рис. 2) разработан в [3] и доработан в [5].

Детали метода применительно к внутреннему сопротивлению проводника представлены в [3]; применительно к сопротивлению земли, используемой в качестве обратного провода ВЛ, представлены в докладе на прошлой конференции [5]; применительно к моделированию заземлителей в частотно зависимом грунте – в материалах текущей конференции [8].

**Моделирование нелинейных элементов** в шаговых алгоритмах не вызывает затруднений – их величины постоянны в течение шага и пересчитываются в конце каждого шага.

**Модель ОПН** представляет собой резистор с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ), который моделируется статическим сопротивлением. На каждом временном шаге проводится два расчета: с сопротивлением, полученным в начале и в конце шага. Через полученные точки проводится прямая линия, пересечение которой с ВАХ определяет текущее сопротивление ОПН.

**Изолятор ВЛ** моделируется ключом. Вначале ключ разомкнут. В момент времени  $t$ , когда напряжение на гирлянде изоляторов превысит вольт-секундную характеристику (BCX) [9]

$$U_{разр}(t) = 340l \left( 1 + \frac{15}{t + 9,5} \right) [\text{кВ}], t [\text{мкс}],$$

где  $l$  – длина гирлянды изоляторов, ключ замыкается (в программе становится медным стержнем).

**Коронный разряд** моделируется динамической емкостью (на фронте волны) по модели ВНИИЭ [10, С. 78]

$$C_d(u) = 4 / 3 \cdot C_0 \cdot B \cdot \sqrt[3]{u / U_0}, du dt > 0,$$

где  $C_0$  – геометрическая емкость провода,  $u$  – напряжение провода,  $U_0$  – начальное напряжение коронного разряда,  $B = 0,85$  при отрицательной полярности и  $B = 1.02$  при положительной полярности.

Емкость рассчитывается в конце каждого шага и принимается постоянной величиной на следующем шаге. Дополнительная емкость, превышающая геометрическую емкость провода,  $C_d(u) - C_0$  делится на две части и добавляется в узлы элемента. Скачкообразное изменение емкости ведет к скачкообразному изменению напряжения на конденсаторе (обобщенный закон

коммутации). Нам не удалось добиться устойчивых расчетов по формуле трапеций (по причинам, описанным ранее), в то же время метод Влаха работает устойчиво.

Более сложная модель короны (модель Suliciu с итерационным уточнением на каждом временном шаге) описана в документации к программе EMTP-RV. Там же выполнено сравнение расчетов с данными измерений (рис. 4а). Но и наши расчеты (не требующие итерационных уточнений) согласуются с данными измерений (рис. 4б).

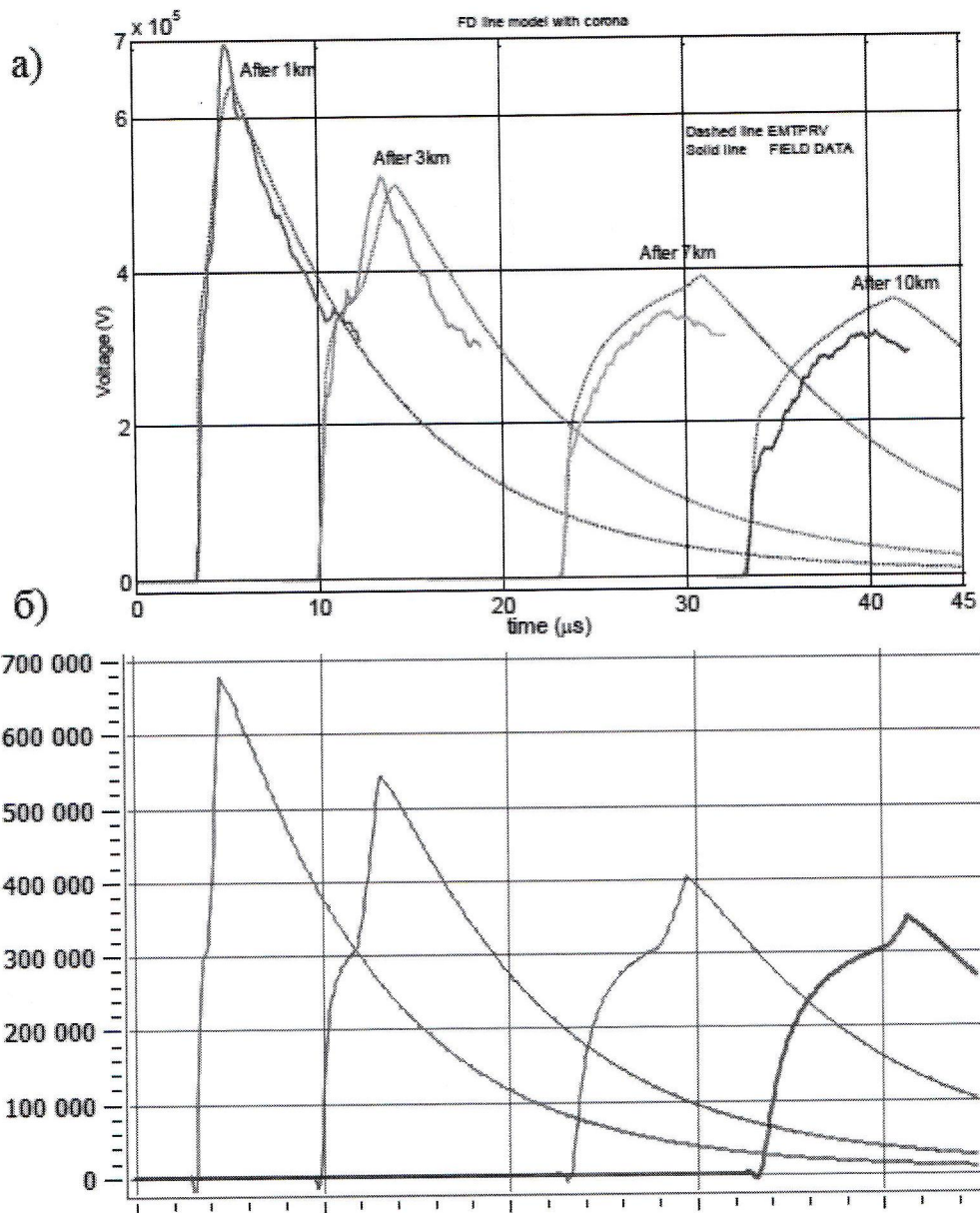


Рис. 4. Напряжение в линии длиной 12.5 км на расстоянии 1, 3, 7, 10 км от ее начала, полученное экспериментально (Gary) и расчетным путем по программе EMTP-RV (верхний рисунок) и по программе ЗУМ (нижний рисунок) при подаче импульса  $u(t) = U_m [0.988e^{-0.123t} - 1.064e^{-4.1t} \sin(12.3t + 70^\circ)]$ , где  $U_m = 850 \cdot 10^3$ ,  $t$  [мкс].

Проводились расчеты и с другими моделями импульсной короны (модель СПБПУ, модель Lee, модель Gary). Модель Gary согласуется с экспериментами, но применима только для положительных импульсов. Остальные модели в меньшей степени соответствуют данным измерений на ВЛ (А.К. Потужный и С.М. Фертик 1938 г., С. Gary 1983 г., С.Ф. Wagner 1954 г.).

#### 4. Моделирование грозových перенапряжений ПС при ударе молнии в ВЛ

Геометрическая модель ПС с подключенной ВЛ представлена на рисунке 5. Электрооборудование ПС моделируется входными емкостями [9, Таблица П30] (рис. 6), подключенными к заземлителю ПС. Железобетонные фундаменты опор ВЛ моделируются проводниками [11]. Грунт однослойный с удельным сопротивлением  $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

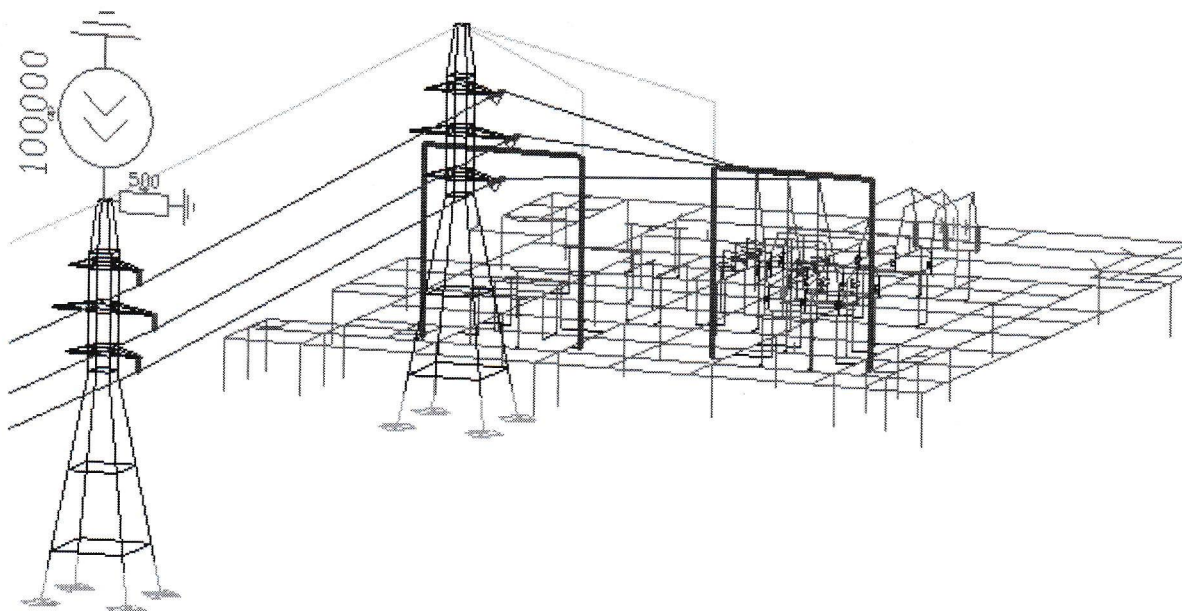


Рис. 5. Расчетная модель ПС 150/10 кВ и ВЛ (три опоры ВЛ не показаны)

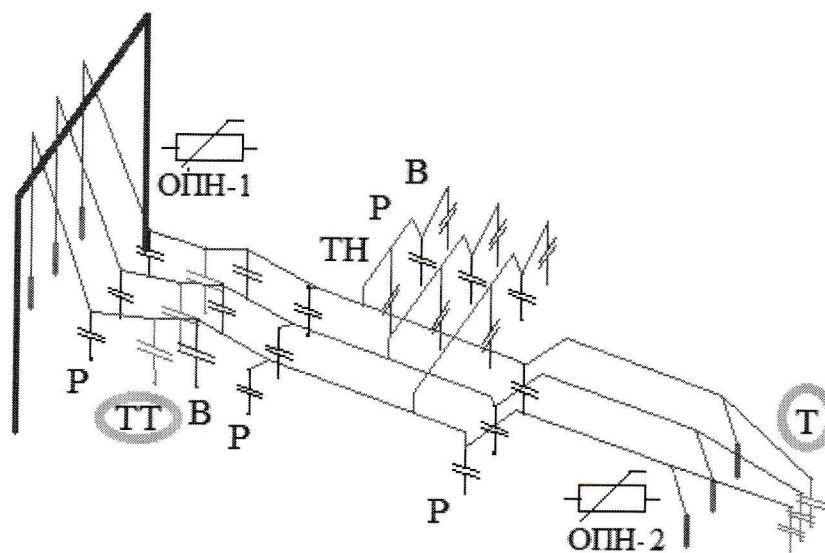


Рис. 6. Моделирование электрооборудования ПС

Рассмотрим удар молнии с током 100 кА длительностью 10/350 мкс в опору ВЛ (рис. 5). Обратное перекрытие изоляции происходит в момент времени, когда напряжение на изоляции  $U = U_{\text{оп}} - U_{\text{пр}}$  превышает ВСХ изоляции, где  $U_{\text{оп}}$  – напряжение опоры,  $U_{\text{пр}}$  – напряжение провода.

Если не учитывать рабочее напряжение проводов, то первой перекрывается изоляция нижней фазы (рис.7). Напряжение опоры для всех фаз почти одинаково (при

большом сопротивлении заземлителя опоры), но верхняя фаза дальше от троса, поэтому напряжение провода, наведенное током троса, здесь наименьшее, а напряжение на изоляции наибольшее. Волна тока в нижней фазе приводит к резкому возрастанию напряжения проводов и снижению напряжения на изоляции двух других фаз, поэтому перекрытие изоляции далее происходит с запаздыванием.

Исследовалось влияние канала молнии на перекрытие изоляций. Канал молнии, который согласно МЭК 62305-4 моделировался вертикальным проводником длиной 100 м, через магнитные связи увеличивает напряжение на стойке опоры. Но при большом сопро-

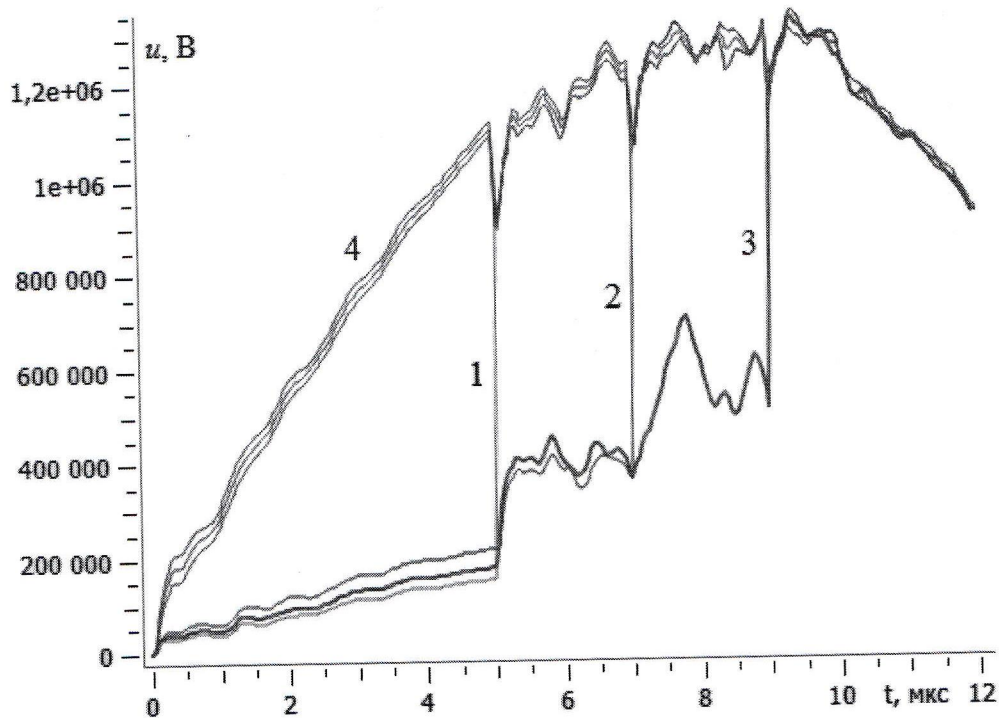


Рис. 7. Напряжение проводов ВЛ: 1– нижнего, 2– верхнего. 3- среднего и 4–напряжение опоры при ударе молнии с током 100 кА, 10/350 мкс с линейным фронтом в вершину опоры (рис. 5)

тивлении заземлителя (а именно этот случай представляет опасность) напряжение опоры меняется незначительно и влиянием канала молнии можно пренебречь.

При обратном перекрытии изоляции возникает волна перенапряжения с крутым фронтом независимо от формы тока молнии. Распространяясь по проводам, она может привести к перекрытию изоляции (уже прямому) соседних опор, а набегающая на ПС, воздействует на изоляцию высоковольтного оборудования.

Снижение сопротивления заземлителя позволяет устранить обратное перекрытие изоляции. 3D моделирование заземлителей позволяет легко проанализировать возможные варианты. Эффективным средством является соединение заземлителей ближайших опор с заземлителем ПС.

Если перекрытие изоляции опоры ВЛ произошло, то волны перенапряжения (рис.7) с линии попадают в шины ПС, добегают и отражаются от емкости силового

трансформатора, возвращаются к пораженной опоре (опорам), отражаются с изменением знака и вновь набегают на ПС. Возникает колебательный процесс, затухающий медленно из-за малого активного сопротивления проводов и шин. При срабатывании ОПН и подключении заземлителя ПС колебательные процессы усложняются.

Установка ОПН устраняет перенапряжения. Установка ОПН-2 вблизи силового трансформатора эффективней установки ОПН-1 вблизи портала (рис.6), что подтверждает известные данные. ОПН-2 лучше, чем ОПН-1 защищает не только силовой трансформатор (рис.8), но и трансформатор тока, который находится ближе к ОПН-1 (рис.9). Причина в том, что ОПН-1 подключен к шинам через проводник (шлейф) длиной 11 м, поэтому из-за большой индуктивности шлейфа он срабатывает с запаздыванием при прохождении волн с коротким фронтом.

Дальнейшие расчеты выполним с ОПН-2 (вблизи силового трансформатора, рис. 6). Расчеты с 3D-моделями ВЛ и ПС выявили новый (по сравнению с ЕМТР- моделями) фактор – волновые процессы электрооборудования ПС, вызванные обратным перекрытием изоляции опор ВЛ, начинаются при ненулевых начальных условиях (рис. 10). Ток молнии,

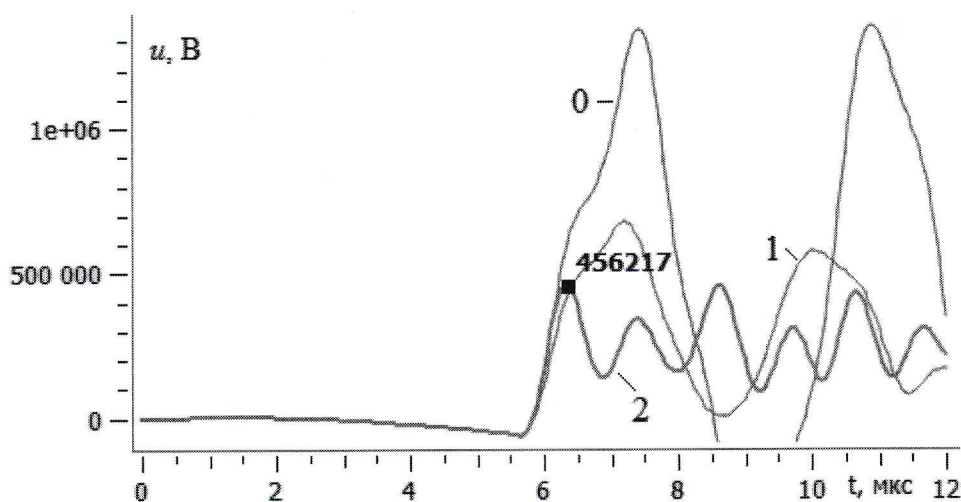


Рис. 8. Напряжение силового трансформатора (относительно заземлителя): 0– без ОПН, 1– с ОПН-1 (у портала), 2– с ОПН-2 (вблизи силового трансформатора)

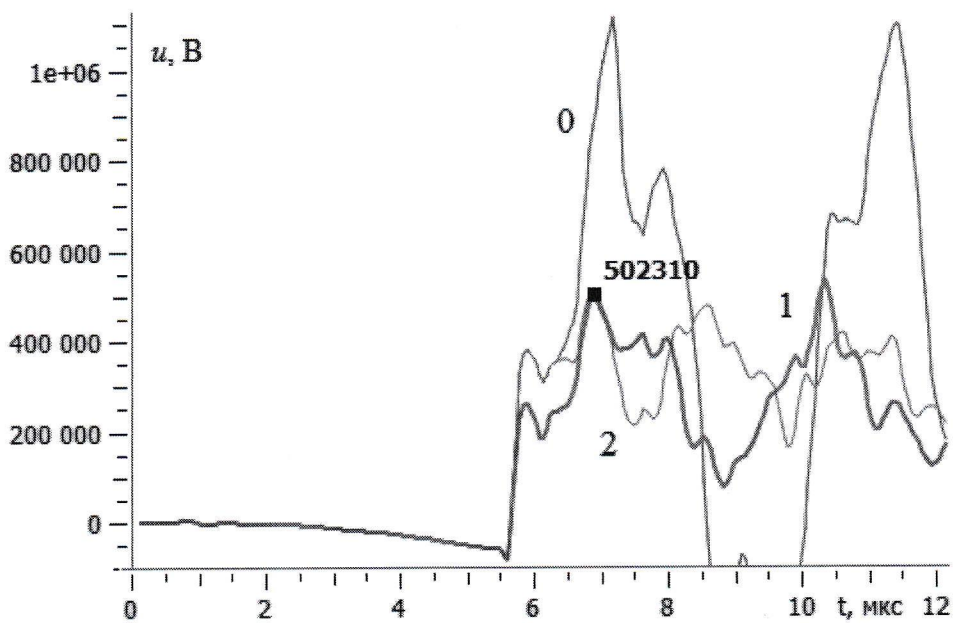


Рис. 9. Напряжение силового трансформатора (относительно заземлителя): 0 – без ОПН, 1– с ОПН-1 (у портала), 2 – с ОПН-2 (вблизи силового трансформатора)

протекающий по грозозащитному тросу, через порталы попадает в заземлитель ПС, вызывая подъем потенциала заземлителя, поэтому в момент прихода волны напряжения по шине начальное напряжение на емкости электрооборудования отрицательное. После срабатывания ОПН одной из фаз ток заземлителя и начальное напряжение на емкости других фаз возрастает, что усиливает колебания напряжения в шинах после прихода волны перенапряжения. Этот эффект, заметный в высокоомных грунтах, отсутствует в ЕМТР моделях, где заземлители портала, ОПН (сосредоточенные сопротивления) не имеют взаимных связей, а емкости электрооборудования не связаны с заземлителем.

Дадим оценку влияния модели заземлителя ПС на волновые процессы в шинах ПС. Для этого «отключим» 3D заземлитель ПС, а порталы и ОПН соединим с удаленной землей через активное сопротивление  $R$  (как в ЕМТР). Рассмотрим вариант  $R=0$  и  $R=6$  Ом (импульсное сопротивление заземлителя ПС на частоте 25 кГц). Емкости электрооборудования вместо заземлителя подключим к удаленной земле (как в ЕМТР).



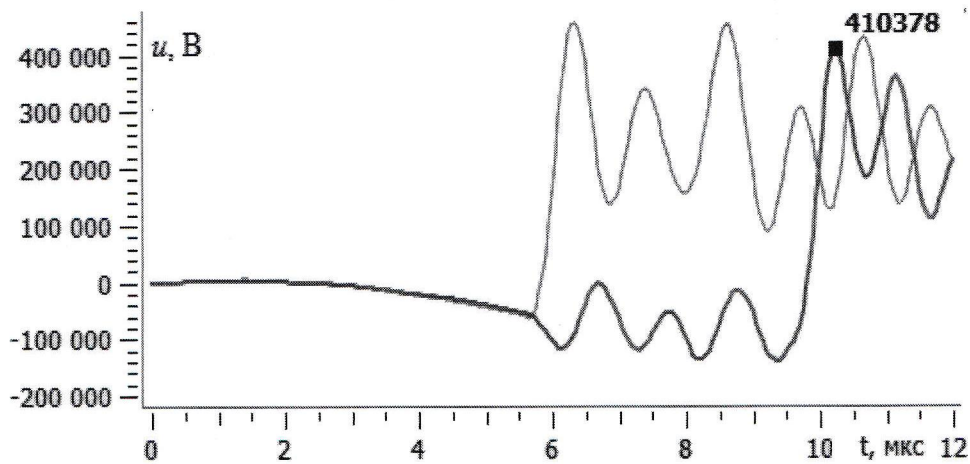


Рис. 10. Напряжение двух фаз силового трансформатора

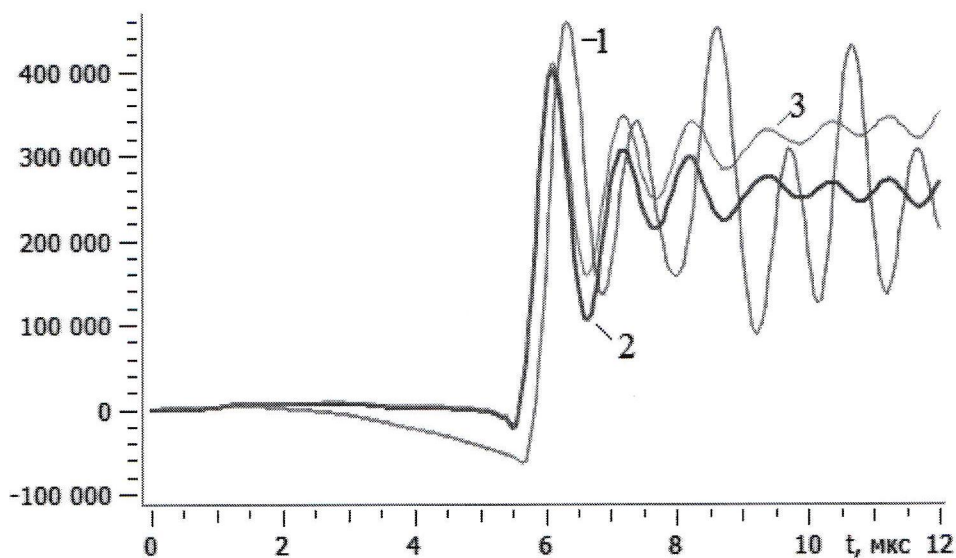


Рис. 11. Напряжение силового трансформатора: 1– с 3D моделью заземлителя, 2– заземлитель  $R=0$  Ом, 2– заземлитель  $R=6$  Ом

3D заземлитель ПС существенно усиливает колебательные процессы (рис.11) и несколько увеличивает первый максимум напряжения (на 10%), причем одинаково по сравнению с упрощенными моделями при  $R=0$  и  $R=6$  Ом (отличие связано с изменением емкости). Расчеты при  $R=0$  в установившемся режиме точнее, чем при  $R=6$  Ом. Заземлитель при упрощенном моделировании следует описывать статическим сопротивлением, чтобы обеспечить корректную величину остающегося напряжения ОПН.

### Выводы

Удар молнии в опору, грозозащитный трос с обратным перекрытием изоляции или прорыв на провода ВЛ вызывает волны перенапряжения, опасные для электрооборудования ПС. Заземлители оказывают существенное влияние на результаты расчета грозовых перенапряжений, поэтому переход к единой 3D модели проводников, расположенных в воздухе и земле, повышает адекватность расчетов. Рассматривая проводник в воздухе частным случаем проводника в земле, теория заземлителей дает апробированные модели, методы и программы для решения задач грозозащиты и подобных задач.

### Список литературы

1. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн, набегающих с воздушных линий / Б. В. Ефимов, Ф. Х. Халилов, А. Н. Новикова, Н. И. Гумерова, Ю. М. Невретдинов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2012. – № 8. – С. 7-25.
2. D. Cavka, N. Mora, F. Rachidi. A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no.2, pp. 177-187, Feb. 2014.
3. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств. Электричество. 2010. № 1. С. 16 – 23.
4. 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.
5. Шишигин Д.С., Шишигин С.Л.. Моделирование волновых процессов в линиях при ударах молнии. 5 Российская конф. по молниезащите: Сб. мат-лов конф.. – СПб, 2016. – С.358-362.
6. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. – М.: Мир, 1999. – 685 с.
7. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
8. Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С. Расчет заземлителей молниезащиты с учетом частотной зависимости проводимости земли. 6 Российская конф. по молниезащите: Сб. мат-лов конф. – СПб, 2018.
9. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под научн. ред. Н.Н. Тиходеева. – Санкт- Петербург: Изд. ПЭИПК, 1999. – 227 с.
10. Техника высоких напряжений / Г.Н. Александров и др., под ред. М.В. Костенко. – М.: Высш.шк., 1973. – 528 с.
11. Шишигин С.Л., Новикова А.Н. Расчет сопротивления заземления фундаментов опор ВЛ из железобетонных грибовидных подножников в неоднородном грунте. Известия НИИ постоянного тока. СПб: 2011. – № 65. – С. 164-173.