

© 2003 г. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А.

Максимальные кратности грозových перенапряжений на подстанции.

Проведен аналитический и компьютерный анализ грозových перенапряжений в схеме “тупиковой” подстанции, оборудование которой защищено с помощью ОПН. Показано, что применение известных упрощенных формул для анализа этих перенапряжений может дать существенную ошибку. Аналитически обоснован максимальный ударный коэффициент перенапряжений в таких схемах, он равен $K_{уд} = 2.43$.

Analytical and computer analysis of lightning overvoltages on equipment protected with metal oxide surge arresters were made in simple substation scheme. Application of the known simplified formulas for the analysis of these overvoltages is shown can give an essential mistake. Maximal overvoltages factor in such circuits is analytically proved, it is equal $K = 2.43$

Введение. При расчетах волновых процессов в задачах грозозащиты оборудования тупиковых подстанций часто рассматривается схема, одним из элементов которой является “бесконечно” длинная линия, по которой на подстанцию приходит грозовая волна. Случай тупиковой подстанции означает, что эта линия заканчивается на одном из элементов оборудования подстанции (чаще всего на трансформаторе). При грозовом воздействии этот элемент допустимо представлять сосредоточенной емкостью. Для защиты такого оборудования от набегающих волн по пути их распространения устанавливается нелинейный ограничитель перенапряжений. В этой “классической” схеме принято считать, что учет сосредоточенной емкости позволяет получить незавышенные крутизны и амплитуды воздействующих на изоляцию перенапряжений. Так, используя упрощенные схемы для решения этой задачи, например [1-3], получают, что при конечной длине фронта падающей косоугольной волны кратность перенапряжений на емкости контура всегда меньше двух (по отношению к амплитуде преломленной после ОПН волны). Однако, более внимательное рассмотрение этой задачи, решение которой изложено в этой статье, показало, что влияние сосредоточенной емкости более сложно, чем это принято считать. В частности, путем аналитических выкладок и компьютерных расчетов показано, что ударный коэффициент в схеме линия-емкость может быть больше двух даже для косоугольной падающей волны.

Расчетная схема. Рассмотрим типичную схему (рис.1) тупиковой подстанции, в которой требуется определить напряжение на оборудовании подстанции (на емкости С), защищаемом нелинейным ограничителем перенапряжений – ОПН. В качестве расчетного

воздействия примем в общем случае косоугольную волну напряжения амплитудой V_m и фронтом τ_v , набегающую по длинной линии с

волновым сопротивлением Z . В силу высокой нелинейности вольтамперной характеристики ОПН можно приближенно считать, что в течение времени воздействия волны на ОПН напряжение на нем остается неизменным и равным некоторому остающемуся напряжению $u_{\text{ОПН}} = U_{\text{осм}} = \text{const}$ (при $V_m > U_{\text{осм}}$). При этих

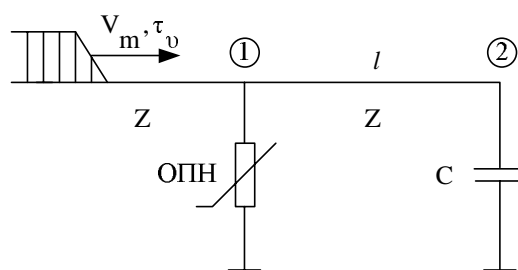


Рис.1 Схема тупиковой ПС

допущениях схема рис.1 может быть сведена к схеме замещения на рис.2, где источник эдс $E = U_{\text{осм}}$ включается на участок линии l в момент достижения волной V_m значения напряжения на ОПН, равного $U_{\text{осм}}$. С этого момента независимо от величины падающей волны (при $V_m > U_{\text{осм}}$) преломленная в линию l волна имеет амплитуду, равную $U_{\text{осм}}$.

Падающая волна имеет прямоугольную форму ($\tau_v = 0$). В этом случае включение источника постоянного напряжения $E = U_{\text{осм}}$ на линию без потерь длиной l и разомкнутую на конце ($C = 0$) (рис.2) дает максимальное напряжение в конце, равное $U_{k \text{ max}} = 2E$. Временная осциллограмма этого напряжения известна и приведена на рис.2. При учете потерь на участке линии напряжение в ее конце будет стремиться к постоянной величине $u_k = E$.

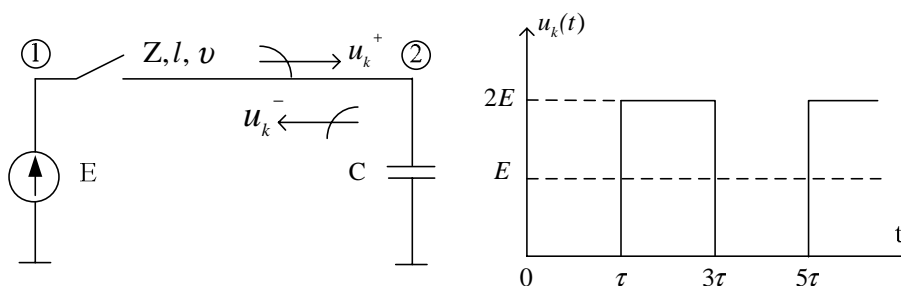


Рис.2. Расчетная схема включения линии, нагруженной на емкость, под постоянное напряжение и напряжение в конце этой линии для случая $C=0$.

Введем теперь в рассмотрение емкость $C \neq 0$ в схеме рис.2. Рассчитаем аналитически переходной процесс в этой схеме, используя операторный метод. Изображение падающей на узел 2 волны (при $E = 1$) равно $\exp(-p\tau)/p$, где $\tau = l/v$, $v \cong 300$ м/мкс, $t = 0$ - момент включения эдс в схему. Изображение падающей волны справедливо для описания ее во временной области в диапазоне $0 \leq t < 3\tau$.

Коэффициент отражения волны напряжения от узла с емкостью (при нулевых начальных условиях) K_u равен:

$$K_u = \frac{1/pC - Z}{1/pC + Z} = \frac{1/T_c - p}{1/T_c + p} = \frac{\alpha - p}{\alpha + p}, \text{ где } \frac{1}{T_c} = \alpha = \frac{1}{ZC} \quad (1)$$

Изображение напряжения в конце линии (для интервала $0 \leq t < 3\tau$) равно:

$$U_k(p) = (1 + K_u) \cdot \frac{e^{-p\tau}}{p} = \frac{2\alpha}{\alpha + p} \cdot \frac{e^{-p\tau}}{p}.$$

Отраженная от емкости, а затем (через время $t = \tau$) и от источника E , волна в качестве падающей вновь придет в узел 2, спустя время $t = 2\tau = 2l/v$ после прихода первоначальной волны. Это приведет к изменению напряжения в узле 2, т.е. к появлению второго слагаемого в выражении для $U_k(p)$:

$$U_k(p) = \left(1 + \frac{\alpha - p}{\alpha + p}\right) \cdot \frac{e^{-p\tau}}{p} + \left[-\frac{\alpha - p}{\alpha + p} - \left(\frac{\alpha - p}{\alpha + p}\right)^2\right] \cdot \frac{e^{-3\tau}}{p} + \left[\left(\frac{\alpha - p}{\alpha + p}\right)^2 + \left(\frac{\alpha - p}{\alpha + p}\right)^3\right] \cdot \frac{e^{-5\tau}}{p} + \dots \quad (2)$$

Третье и последующие слагаемые в (2) также появляются через временной интервал 2τ (в формуле показано напряжение для 3-х временных интервалов).

Теперь воспользуемся выражением (2) и получим оригинал напряжения на емкости для различных интервалов времени.

На интервале $0 \leq t < 3\tau$ в выражении (2) есть только первое слагаемое. Оригиналы $u_{1k}(t - \tau) = 2[1 - e^{-\alpha(t-\tau)}]$, где $u_{1k}(t - \tau) = 0$ при всех $t < \tau$.

На интервале $3\tau \leq t < 5\tau$ в выражении (2) есть два первых слагаемых. Оригиналы $u_{2k}(t) = u_{1k}(t - \tau) - 2 + 2e^{-\alpha(t-3\tau)} + 4\alpha(t - 3\tau)e^{-\alpha(t-3\tau)}$. (3)

На интервале $5\tau \leq t < 7\tau$ в выражении (2) есть три первых слагаемых. Оригиналы $u_{3k}(t) = u_{2k}(t - 3\tau) + 2 - 2e^{-\alpha(t-5\tau)} - 4\alpha^2(t - 5\tau)^2 e^{-\alpha(t-5\tau)}$. (4)

Пример расчета напряжения на емкости в схеме рис.2 при включении линии скачком под постоянное напряжение без учета потерь показан на рис.3 ($Z = 400 \text{ Ом}$, $l = 300 \text{ м}$, $E = 1$, $r = 0$, $C = 500 \text{ пФ}$).

Определим несколько первых экстремумов напряжения на емкости.

- a) На интервале $0 \leq t < 3\tau$ имеем $d(u_{1k}(t))/dt = 2\alpha e^{-\alpha t} > 0$. Видно, что напряжение в указанном интервале экстремумов не имеет, так как монотонно возрастает во времени.
- b) На интервале $3\tau \leq t < 5\tau$ или $0 \leq t' < 2\tau$, где $t' = t - 3\tau$.

Переход от t к t' не влияет на величину экстремума, сдвигая время его наступления.

Тогда из (3) $u_{2k}(t') = u_{1k}(t'+2\tau) - 2 + 2e^{-\alpha t'} + 4\alpha t' e^{-\alpha t'}$, где $u_{1k}(t'+2\tau) = 2 - 2e^{-\alpha(t'+2\tau)}$.

Поэтому $u_{2k}(t') = -2e^{-\alpha(t'+2\tau)} + 2e^{-\alpha t'} + 4\alpha t' e^{-\alpha t'}$. (5)

Имеем уравнение $d(u_{2k}(t'))/dt' = 0$, решив которое, найдем $t'_{\max} = (e^{-2\alpha\tau} + 1)/(2\alpha)$.

Подставим в (5) выражение для t'_{\max} , упростим и получим

$$u_{2k}(t'_{\max}) = -2e^{0.5(-1-4\alpha\tau-e^{-2\alpha\tau})} + 2e^{0.5(-1-e^{-2\alpha\tau})} + 2(e^{-2\alpha\tau} + 1) \cdot e^{0.5(-1-e^{-2\alpha\tau})}.$$

Обозначим $x = \alpha\tau$, тогда последнее выражение приводится к виду

$$u_{2k}(t'_{\max}) = 2e^{-0.5} \cdot e^{-0.5e^{-2x}} \cdot [-e^{-2x} + 1 + (e^{-2x} + 1)] = 4e^{-0.5} \cdot e^{-0.5e^{-2x}}. (6)$$

Из (6) видно, что максимальное значение напряжения на емкости, равное $u_{2k}(t'_{\max}) = 4e^{-0.5} = 2.43$, достигается при достаточно больших значениях $x = \alpha\tau = l/(v \cdot ZC)$. Например, на рис.3 при указанных там параметрах максимально возможное на рассматриваемом интервале $t \in [3\tau \div 5\tau] = [3 \div 5]$ мкс значение напряжения достигается в начале второго интервала, т.е. $u_{2k}(t'_{\max}) = 2.43$.

с) На интервале $5\tau \leq t < 7\tau$ или $0 \leq t' < 2\tau$, где $t' = t - 5\tau$.

С учетом введенных обозначений перепишем (4)

$$u_{3k}(t') = u_{2k}(t'+2\tau) + 2 - 2e^{-\alpha t'} - 4\alpha^2 t'^2 e^{-\alpha t'} (7)$$

Здесь $u_{2k}(t'+2\tau) = u_{1k}(t'+4\tau) - 2 + 2e^{-\alpha(t'+2\tau)} + 4\alpha(t'+2\tau)e^{-\alpha(t'+2\tau)}$ и

$$u_{1k}(t'+4\tau) = 2 - 2e^{-\alpha(t'+4\tau)}.$$

Для определения экстремумов на рассматриваемом интервале запишем уравнение

$d(u_{3k}(t'))/dt' = 0$, решив которое определим

$$t'_{\max 1,2} = \frac{2 + e^{-2\alpha\tau} \pm \sqrt{2 + 2e^{-2\alpha\tau} + 8\alpha\tau e^{-2\alpha\tau} - e^{-4\alpha\tau}}}{2\alpha}. (8)$$

Тогда сами экстремумы определяются из (7) с учетом (8).

Для условий рис.3 ($C=500\text{пФ}$, $Z = 400\text{ Ом}$, $l = 300\text{ м}$, $v = 300\text{ м/мкс}$) из (8) можно найти $t'_{\max 1} = 0.059\text{ мкс}$, $t'_{\max 2} = 0.341\text{ мкс}$, что соответствует $t_{\max 1} = t'_{\max 1} + 5\tau = 5.059\text{ мкс}$ и $t_{\max 2} = t'_{\max 2} + 5\tau = 5.341\text{ мкс}$. Тогда по (7) $u_{3k}(t'_{\max 1}) = 0.253$ и $u_{3k}(t'_{\max 2}) = -0.477$.

Учет потерь в схеме, как это уже указывалось выше, приведет к тому, что экстремальные значения напряжения на каждом интервале будут меньше рассчитанных по полученным формулам. Поэтому наиболее важными с точки зрения практического применения являются формулы, определяющие лишь несколько первых экстремумов,

достигаемых на первых характерных интервалах времени ($3\tau \leq t < 5\tau$, $5\tau \leq t < 7\tau$). При необходимости можно получить выражения и для экстремальных значений напряжения, достигаемых на последующих интервалах.

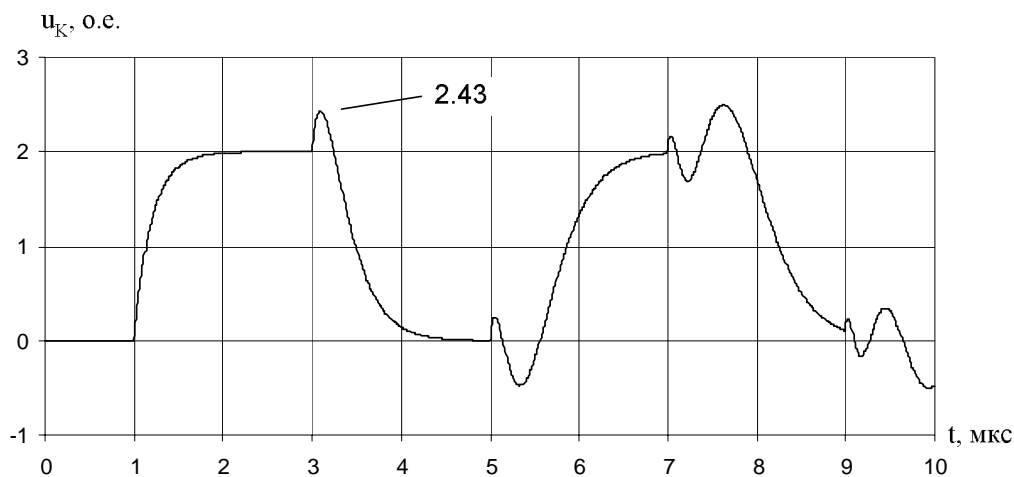


Рис.3. Напряжение на емкости $C=500$ пФ в конце линии с волновым сопротивлением $Z=400$ Ом длиной 300 м без потерь при ее включении скачком под постоянное напряжение $E=1$

Из полученных выражений и рис.3 видно, что напряжение на емкости в схеме рис.2 может достигать значений, больших удвоенного напряжения источника E . Можно дать следующие объяснения природе этого явления. На рис.4а приведены падающая u_k^+ и отраженная u_k^- волны от узла с емкостью в интервале времени $0 \leq t \leq 3\tau$ (здесь за начало отсчета принят момент прихода падающей волны к узлу с емкостью). В этом интервале отраженная волна u_k^- изменяется от -1 до нуля по экспоненциальному закону с показателем $\alpha = 1/(ZC)$. Эта волна приходит к источнику E (в узел 1) в момент времени 2τ и является падающей для этого узла. Для сохранения неизменной заданной величины напряжения источника $E = 1$ от него должна отразиться в сторону линии волна, численно равная разности $E - u_k^-$. Таким образом, в момент $t = 2\tau$ в начале линии образуется волна с амплитудой, равной 2, которая с соответствующим сдвигом во времени в момент $t = 3\tau$ придет в конец линии (см. рис.4б, волна u_k^+). Далее эта волна снижается до нуля. Таким образом, кратковременное возникновение волны $u_k^+ > 1$ величиной, большей, чем первоначально создавалась источником ($u_k^+ = 1$), и создает ту добавку напряжения, которая увеличивает ударный коэффициент схемы ($K_{yo} > 2$). Как видно из рис.4б,

“подзарядка” емкости имеет место в течение времени, пока падающая на узел с емкостью волна u_k^+ заключена в интервале $1 < u_k^+ \leq 2$.

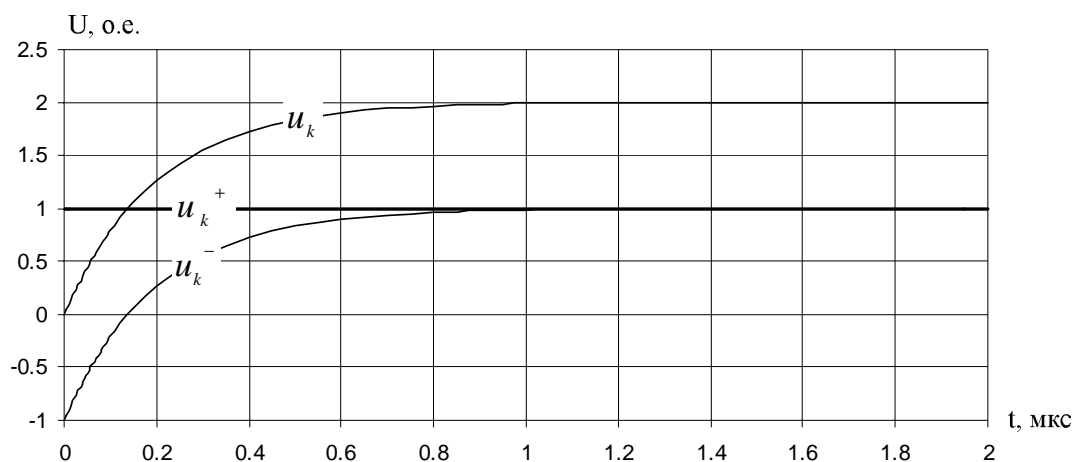


Рис.4а. Падающие и отраженные от емкости волны в условиях рис.3 для первого отражения (время $\tau \leq t < 3\tau$)

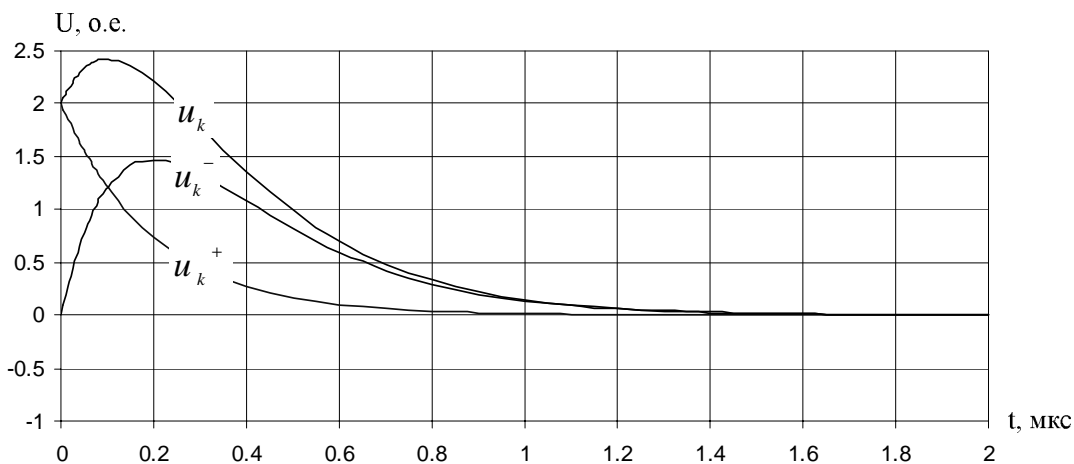


Рис.4б. Падающие и отраженные от емкости волны в условиях рис.3 для второго отражения (время $3\tau \leq t < 5\tau$)

Параметры схемы, для которой получен рис.3, таковы, что к моменту прихода на емкость в момент $t = 3\tau$ подзаряжающей ее волны, напряжение на ней уже достигло $2E$, т.е. дальнейшая кратковременная подзарядка емкости приведет к увеличению напряжения свыше $2E$, т.е. ударный коэффициент будет больше 2.

Очевидно, что возможно такое сочетание постоянной времени заряда емкости $T_c = 1/\alpha = ZC$ и времени пробега $\tau = l/v$, что к моменту $t = 3\tau$ прихода подзаряжающей волны напряжение на емкости будет меньше $2E$ и, таким образом, даже с учетом подзарядки на рассматриваемом интервале $3\tau \leq t < 5\tau$ ударный коэффициент будет меньше двух.

Если на интервале $3\tau \leq t < 5\tau$ по описанным выше причинам напряжение на емкости не достигнет своего максимального значения $U_{2\max} \geq 2E$, то это произойдет на одном из следующих интервалов (например, на интервале $5\tau \leq t < 7\tau$). Так на рис.5

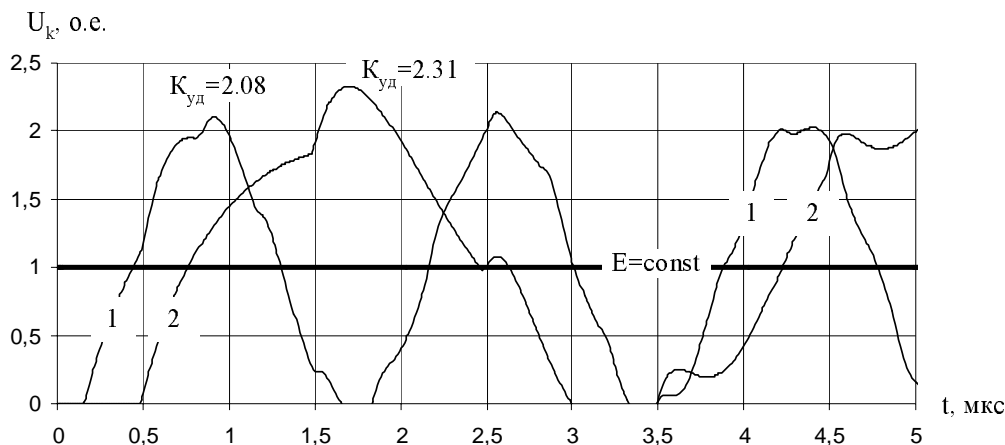


Рис.5. Включение источника прямоугольного напряжения в расчетной схеме рис.2 при $E=U_{ост}=1$, $Z=400$ Ом, $C=1000$ пФ, $l=50$ м (кривая 1) или $l=150$ м (кривая 2)

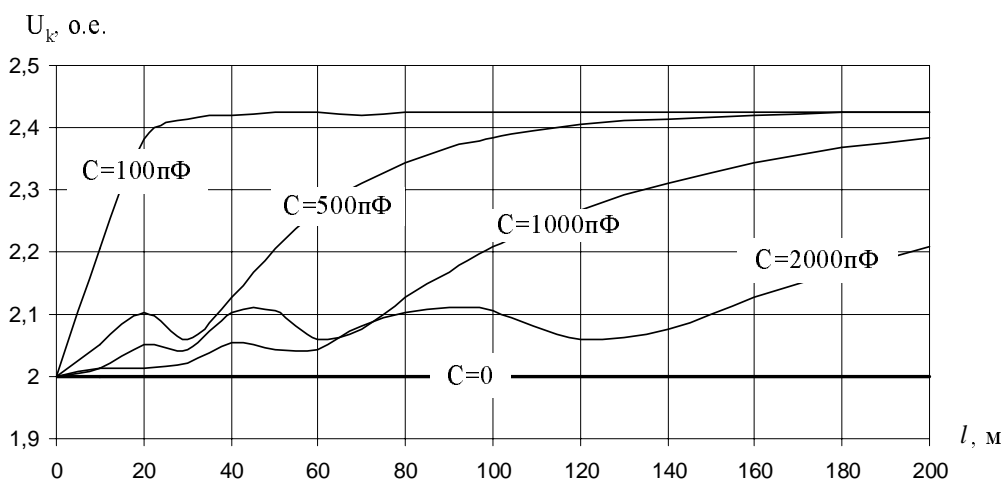


Рис.6. Максимальные перенапряжения при включении источника постоянного напряжения $E=U_{ост}=1$ на участок воздушной линии ($Z=400$ Ом) с емкостью на конце

(кривая 1) максимальное напряжение достигается именно на этом интервале, в то время как на кривой 2 (или на рис.3) оно достигается на интервале $3\tau \leq t < 5\tau$.

Таким образом, для аналитического определения максимального значения напряжения на емкости надо провести вычисление экстремальных значений напряжения по формулам для нескольких первых интервалов (по (6) для $3\tau \leq t < 5\tau$, по (7) и (8) для $5\tau \leq t < 7\tau$) и из полученных значений выбрать максимальное напряжение (“абсолютный максимум”).

На рис.6 приведены результаты компьютерных расчетов абсолютных максимумов напряжения на емкости C при варьировании ее величины и длины защищаемого участка

(в долях от величины остающегося напряжения на ОПН $E = U_{ост}$). Область варьируемых параметров типична для задач по грозозащите подстанций. Формула (6) для максимума напряжения на емкости (на интервале $3\tau \leq t < 5\tau$) дает монотонное увеличение этого максимума с ростом длины участка (при ударном коэффициенте K_{y0} всегда большем 2-х: $K_{y0} > 2$). В принципе, это отражается зависимостями, показанными на рис.6. Однако, как видно на этом рисунке, для каждой емкости имеется область малых длин l , при которых наблюдаются “колебания” максимумов напряжения, что отражает переход “абсолютного” максимума из одного характерного интервала в другой. Предельное значение ударного коэффициента $K_{y0} = 2$, как следует из изложенного, имеет место только при нулевой емкости $C = 0$. Полученные формулы (6) и (8) будут несправедливы для случая $C = 0$. Однако получение подобных формул путем предельного перехода показывает, что максимумы напряжения на емкости полностью соответствуют рис.2.

В заключение заметим, что расчет подобного переходного процесса с использованием, например, “П” – схем замещения участка линии дает значение ударного $K_{y0} = 2$ (без учета потерь), и только учет волнового характера процесса приведет к значению ударного коэффициента $K_{y0} > 2$.

Падающая волна имеет косоугольную форму с крутизной a . Анализ влияния емкости C и крутизны напряжения a на максимальные перенапряжения проведем упрощенно, показав лишь основные отличия от результатов, изложенных для прямоугольной волны. Главным образом остановимся на процессе заряда емкости от источника косоугольного напряжения $E(t) = at$ через участок линии, определив основные параметры отраженной от емкости волны. Влияние длительности фронта t_ϕ воздействующего напряжения, момент достижения напряжением на емкости своего максимального значения рассматривать не будем.

Операторное изображение волны $u(t) = at$ выглядит как $u(p) = a/p^2$. Спустя время $t = \tau$, к емкости придет волна от источника $u_k^+(p) = ae^{-p\tau}/p^2$. Отраженная от емкости волна $u_k^-(p) = K_u(p) \cdot u_k^+(p) = \frac{\alpha - p}{\alpha + p} \cdot \frac{ae^{-p\tau}}{p^2}$, где коэффициент отражения $K_u(p) = (\alpha - p)/(\alpha + p)$. Изображение напряжения на емкости, справедливое для интервала $0 \leq t < 3\tau$, $u_k(p) = u_k^+(p) + u_k^-(p) = \frac{2\alpha a}{p^2(\alpha + p)} \cdot e^{-p\tau}$.

Тогда, определив оригинал и отбросив “чистый” сдвиг, напряжение на емкости при падении на нее косоугольной волны описывается выражением $u_k(t) = 2at + \frac{2a}{\alpha} \cdot (e^{-\alpha t} - 1)$.

Отраженная от емкости волна, очевидно, описывается выражением $u_k^-(t) = u_k(t) - at = at + \frac{2a}{\alpha} \cdot (e^{-\alpha t} - 1)$.

Падающая на емкость и отраженная от нее волны, а также напряжение на емкости построены для случая $Z = 400$ Ом, $C = 1000$ пФ, $a = 2.8$ о.е./мкс на рис.7.

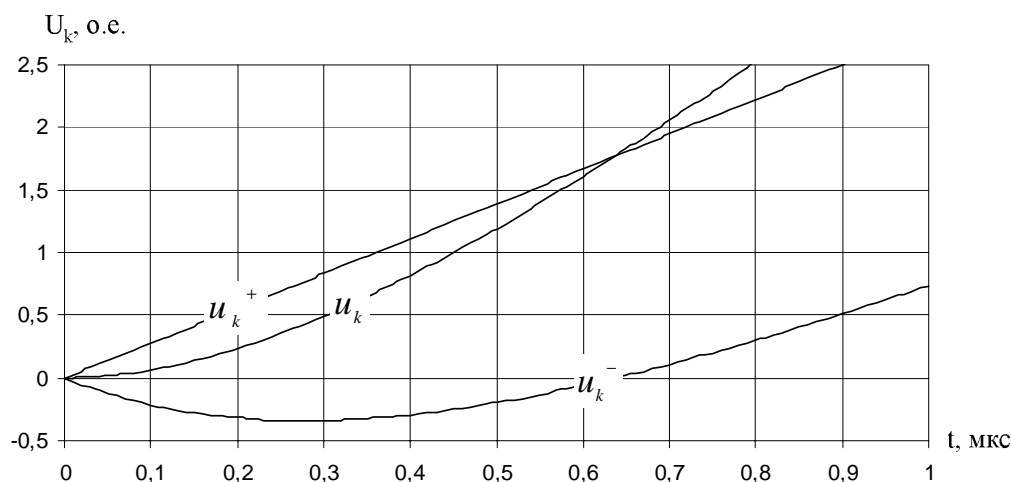


Рис.7. Напряжение на емкости $C=1000$ пФ после первого отражения падающей по линии косоугольной волны $a=2.8$ о.е./мкс, $Z=400$ Ом. Время $0 \leq t < 2\tau$ отсчитывается от момента прихода волны в конец линии.

Найдем параметры отрицательной части отраженной волны $u_k^-(t)$, в частности длительность ее отрицательной части. Ее можно определить из решения уравнения

$$u_k^-(t) = at + \frac{2a}{\alpha} \cdot (e^{-\alpha t} - 1) = 0, \text{ преобразуя которое, получим } \alpha t + 2e^{-\alpha t} - 2 = 0, \text{ откуда } \alpha t_1 = 0$$

и $\alpha t_2 \approx 1.6$. Таким образом, длительность отрицательной части $u_k^-(t)$ будет:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 1.6 / \alpha = 1.6 \cdot ZC .$$

Найдем момент времени, отвечающий минимуму отрицательной части и значение

этого минимума. Для этого решим уравнение $\frac{du_k^-(t)}{dt} = a + \frac{2a}{\alpha}(-\alpha)e^{-\alpha t} = 0$. Откуда

получим, что момент наступления минимума соответствует $\alpha t_m = -\ln(0.5) = 0.693$ и равен

$$t_m = 0.693 / \alpha = 0.693 \cdot ZC . \text{ Величина минимума составляет}$$

$$u_k^-(t_m) = a \frac{-\ln(0.5)}{\alpha} + \frac{2a}{\alpha} (0.5 - 1) = (-\ln(0.5) - 1) \frac{a}{\alpha} = -0.307a \cdot ZC .$$

Для рис.7 $u_k^-(t_m) = -0.307a \cdot ZC = -0.307 \cdot 2.8 \cdot 400 \cdot 1000 \cdot 10^{-6} = -0.34$ о.е.

Из полученных выражений $\Delta t = 1.6 \cdot ZC$, $t_m = 0.693 \cdot ZC$, $u_c^-(t_m) = -0.307a \cdot ZC$ видно, что при постоянной крутизне a косоугольной волны длительность отрицательной части волны $u_k^-(t)$, момент наступления минимума и сама величина минимума волны $u_k^-(t)$ пропорциональны емкости. При значении емкости $C \rightarrow 0$ отрицательной части отраженной волны не существует, отраженная волна в точности равна падающей, т.е. напряжение в конце рассматриваемого участка линии описывается выражением $u_k(t) = 2at$, справедливым с момента прихода падающей волны $t = 0$ до момента $t = 2\tau$, когда придет отраженная от источника волна. Даже при малых значениях емкости можно увеличить отрицательную часть волны $u_c^-(t)$ за счет увеличения крутизны падающей волны a . Это подтверждается рис.6, где любое значение емкости $C \neq 0$ приводило к росту перенапряжений свыше кратности равной двум, а в пределе - до кратности 2.43 (т.к. там падающая волна имела бесконечную крутизну). Поэтому можно сделать вывод о том, что при включении схемы рис.2 под косоугольное напряжение любой, даже очень большой, но конечной крутизны a , максимальное напряжение на емкости никогда не превысит напряжения кратности 2.43. На рис.8 есть точка, в которой пересекаются все зависимости напряжения от длины участка с емкостью на конце. Координата этой точки по оси абсцисс соответствует условию $t_\phi = 2\tau = 2l_{кр} / v_c$.

При $l < l_{кр}$ рост емкости приводит к монотонному росту максимального напряжения (рис.8). Это можно связать с тем, что с увеличением емкости монотонно, согласно выражению $u_c^-(t_m) = -0.307a \cdot zC$, растет отрицательная часть отраженной от емкости волны. Тогда приход к емкости такой волны после отражения от источника приведет к ее дополнительному заряду, т.е. увеличению максимального напряжения сверх значения, соответствующего $C = 0$. Больше емкость – больше увеличение напряжения по сравнению со случаем $C = 0$. В этой области рис.8 ударный коэффициент не выше 2-х.

При $l \geq l_{кр}$ (больше время пробега τ) отраженная от емкости волна, возникая первоначально при действии косоугольной падающей волны, затем отразится от источника уже как от источника постоянного напряжения. Поэтому в этой области длин кратности перенапряжений заведомо выше двух. Однако помимо повышения кратности напряжения свыше 2-х область $l \geq l_{кр}$ характеризуется неоднозначным влиянием емкости на получаемые максимальные напряжения.

При $l \geq l_{кр}$ из-за конечного фронта $2\tau > t_\phi$ падающей на емкость волны, начиная с некоторого значения емкости $t_m = 0.693 \cdot zC > t_\phi$, “добавка” не будет успевать достигнуть своего наибольшего значения $u_c^-(t_m) = -0.307a \cdot zC$, т.е. существует некоторое критическое значение емкости, начиная с которого максимальное напряжение u_{2max} будет уменьшаться.

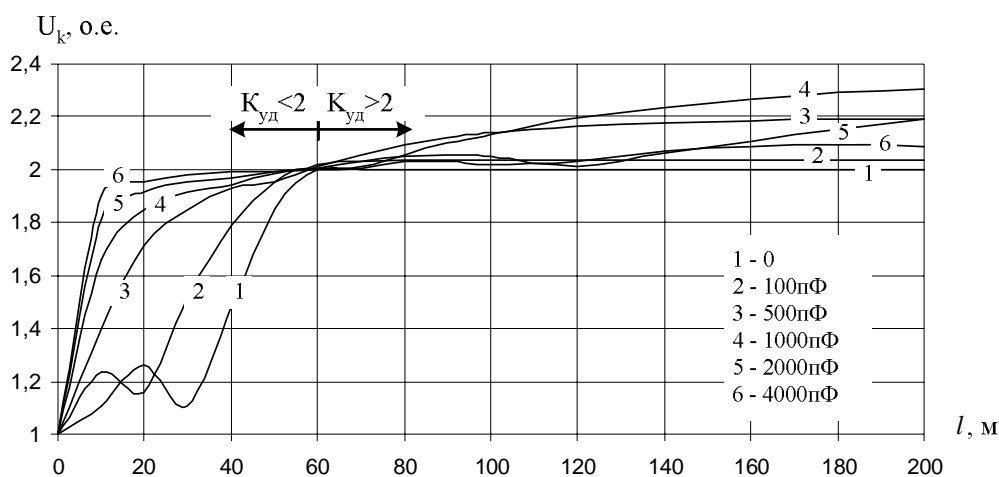


Рис.8. Максимальные перенапряжения при включении источника косоугольного напряжения $E=U_{ост}=1$, $t_\phi=0.36$ мкс на участок воздушной линии ($Z=400$ Ом) с емкостью C на конце

Приблизительно такую критическую емкость можно найти из условия $t_m = 0.693 \cdot zC_{кр} = t_\phi$, откуда

$$C_{кр} = \frac{t_\phi}{0.693 \cdot z}. \quad (9)$$

В условиях рис.8 $C_{кр} = \frac{0.36}{0.693 \cdot 400} \cdot 10^6 \cong 1300$ пФ. Т.е. при $l \geq l_{кр}$ и $C < C_{кр}$ рост емкости приводит к увеличению получаемых напряжений, а при $l \geq l_{кр}$ и $C \geq C_{кр}$ рост емкости уже приводит к снижению перенапряжений. На самом деле значение критической емкости $C_{кр}$ несколько меньше, чем по (9). Процесс заряда емкости происходит медленнее роста падающей на емкость волны at .

Результаты компьютерных расчетов на рис.8 показывают, что критической емкостью действительно является значение $C_{кр} \approx 1000$ пФ, что совпадает с одним из выбранных для построения значений емкостей.

Для прямоугольного импульса (импульса с бесконечной крутизной $a \rightarrow \infty$) $t_\phi = E/a \rightarrow 0$ и формула (9) дает $C_{кр} \rightarrow 0$, т.е. рост емкости, начиная с любого сколь

угодно малого значения $C \neq 0$, приведет к снижению получаемого максимального напряжения, что и дает рис.б.

В заключение отметим, что известная формула для расчета напряжения на емкости (для $\tau_\phi \neq 0$) в эквивалентном LC контуре [1-3] дает максимальное напряжение

$$\frac{U_k}{E} = 1 + \frac{\sin\left(\pi \frac{\tau_\phi}{T}\right)}{\pi \frac{\tau_\phi}{T}}, \quad (10)$$

где $T = 2\pi\sqrt{L_{II}C_s}$, L_{II} - индуктивность “П” схемы замещения, $C_s = C_{II} + C$ и C_{II} - емкость “П” схемы.

Видно, что и в этом случае эквивалентирование длинной линии путем ее представления “П” (или “Т”) схемой замещения также приводит к ошибкам. Так по формуле (10) ни при каких параметрах линии и емкости невозможно получить ударный коэффициент больше двух ($l > l_{кр}$).

Выводы. 1. В результате исследований показано, что в типовой схеме тупиковой подстанции, оборудование которой защищено ОПН, кратность перенапряжений может превысить двойное значение преломленной в узле с ОПН волны.

2. Определена совокупность параметров схемы, влияющих на кратность перенапряжений, а именно: крутизна воздействующего напряжения; емкость в конце линии; длина и волновое сопротивление линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике // М., Энергия, 1968, 463 с.
2. Техника высоких напряжений // под ред. Д.В. Разевига, М., Энергия, 1976, 477 с.
3. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети // Санкт-Петербург, изд-во Сизова М.П., 2001, 304 с.