

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВОЛН ПРИ РАСЧЕТЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ОБОРУДОВАНИИ ПОДСТАНЦИЙ

А.С. Гнеушев, А.С. Добросотских, Л.Г. Мизунова

Самарский государственный технический университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244.
E-mail: dob_as@rambler.ru

Рассматриваются вопросы определения перенапряжений с учетом затуханий и деформации волн. Изложенный метод позволяет реализовать на ЭВМ определение деформации волн за счет влияния земли при распространении их по отрезкам линии, соединяющих узлы схемы подстанции.

Ключевые слова: перенапряжения, деформация волн, функция искажения, оригинал, интеграл Карсона.

При определении перенапряжений, возникающих на оборудовании подстанции при набегании с линии волн атмосферных перенапряжений, необходимо учитывать затухание и деформацию волн, образующихся как от влияния импульсной короны, так и от воздействия сопротивления земли и проводов. Влияние импульсной короны может быть учтено по методике, предложенной Шатиным [1], которая основана на приближенной замене отрезка коронирующей линии равным отрезком некоронирующей и динамической емкостью, зависящей от напряжения. Поэтому в настоящей работе рассматривается задача, связанная с учетом влияния сопротивления земли и проводов, поскольку при определении перенапряжений возникают затруднения, обусловленные многократными отражениями от узловых точек подстанции. Выражение для искаженной волны может быть представлено в виде

$$U_2(p) = U_1(p) \cdot \varphi(p), \quad (1)$$

где $U_1(p), U_2(p)$ – операторное изображение волны до и после пробега по линии длиной x , $\varphi(p)$ – операторная функция.

При переходе к оригиналу с помощью интеграла Дюамеля

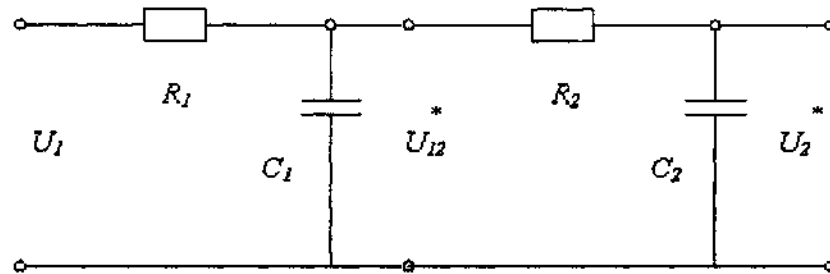
$$U_2(t) = \int_0^t U_1(\tau) \cdot \varphi(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $U_1(\tau)$ – оригинал изображения волны, возникает необходимость интегрирования на каждом шаге по времени, так как под знаком интеграла находится функция с запаздывающим аргументом, что значительно затрудняет использование метода «шаг за шагом», нашедшего широкое применение при численных расчетах распространения волн в схемах подстанции. Это затруднение можно обойти, если подобрать для функции $\varphi(t)$ более простое приближенное выражение. В работе [2] в качестве та-

*Гнеушев Александр Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Электрические станции».
Добросотских Алексей Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Электрические станции».
Мизунова Людмила Геннадьевна – доцент кафедры «Электрические станции», к.т.н., доцент.*

кой простой функции предлагается передаточная функция соединения, состоящего из нескольких RC -звеньев (рис.1).

Считая, что волна распространяется по линии только с запаздыванием, включаем на её конце звенья искажения. Напряжения U_{12}^* и U_2^* могут быть определены последовательно на каждом шаге методом подкасательной или волновым методом [4].



Р и с. 1. RC -звенья, имитирующие искажение волны из-за влияния сопротивления земли и проводов

Однако авторы [1, 2] не дают метода выбора параметров звеньев искажения. Это может быть сделано при использовании метода «мнимых частот», предложенного Оурком [4].

Напряжение U_2^* при принятых условиях может быть записано в виде, аналогичном (1):

$$U_2^*(p) = U_1(p) \cdot \varphi^*(p), \quad (3)$$

где

$$\varphi(p) \approx \varphi^*(p) = \frac{1}{\lambda_1 p^2 + \lambda_2 p + 1} = \frac{1}{\lambda_1 (p - x_1)(p - x_2)}, \quad (3a)$$

$$\lambda_1 = R_1 C_1 R_2 C_2, \quad \lambda_2 = R_1 C_1 + R_2 C_2,$$

где x_1, x_2 – корни приведенного полинома $P(\lambda) = p^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} p + \frac{1}{\lambda_1}$.

Нетрудно видеть, что операционному изображению (3a) соответствует оригинал

$$\varphi^*(t) = \frac{x_2 e^{-x_1 t} - x_1 e^{-x_2 t}}{x_1 - x_2} + 1. \quad (4)$$

Приравнивая $\varphi(t)$ и $\varphi^*(t)$, полагаем $p = \delta_i, i = 1, 2, \dots, m, 0 < \delta_i < \infty$.

Выбираем при этом m из условия описания с необходимой точностью $\varphi(\delta_i)$ и $\varphi^*(\delta_i)$. Это позволяет образовать систему из m условных уравнений:

$$(\lambda_1 \delta_i^2 + \lambda_2 \delta_i + 1)\varphi(\delta_i) = 1, i = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

где неизвестными являются λ_1 и λ_2 .

Система нормальных уравнений может быть получена с помощью матричного преобразования [4], соответствующего обработке (5) по методу наименьших квадратов. Принимая матричное обозначение

$$M = \begin{vmatrix} \delta_1^2 \varphi(\delta_1) & \delta_1 \varphi(\delta_1) \\ \delta_2^2 \varphi(\delta_2) & \delta_2 \varphi(\delta_2) \\ \dots & \dots \\ \delta_m^2 \varphi(\delta_m) & \delta_m \varphi(\delta_m) \end{vmatrix},$$

где M_i – матрица, транспонированная по отношению к M ,

$$N = \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} 1 - \varphi(\delta_1) \\ 1 - \varphi(\delta_2) \\ \dots \\ 1 - \varphi(\delta_m) \end{vmatrix},$$

можно записать:

$$M_i M N = M_i B, \quad (6)$$

откуда получаем систему из двух уравнений с двумя неизвестными

$$M_1 N = B_1. \quad (7)$$

Здесь обозначения ясны из (6).

Решая (7) и подставляя полученные значения λ_1, λ_2 и x_1, x_2 в (3а), можно определить параметры цепочек, если предварительно принять для определенности $R_1 = R_2 = Z_0$ (Z_0 – волновое сопротивление).

Практика расчетов на ЭВМ показывает, что определитель системы (7) часто бывает близок к нулю, что приводит к значительным ошибкам при её решении. Поэтому целесообразно производить уточнение вектора решения N с помощью алгоритмов уточнения [4].

Определение параметров звеньев искажения, являющихся элементами матричного экспоненциала $e^{-\gamma_n(p)}$, связано с вычислением при вещественных значениях оператора p интегральных выражений, учитывающих влияние сопротивления земли. С этой целью произведено табулирование интегралов Карсона при вещественных p . Учитывая то обстоятельство, что длины отрезков линий, соединяющих узлы подстанции, относительно невелики (в большинстве случаев – не более 200-500 метров), можно пренебречь искажением в каналах, обладающих малым затуханием, считая, что волна в них запаздывает без искажения на время пробега по данному отрезку

линии. При этих условиях параметры звеньев искажения определяются только для земляного канала (три фазы – земля).

Изложенный метод позволяет удобно реализовать на ЭВМ определение деформации волн за счет влияния земли при распространении их по отрезкам линии, соединяющих узлы схемы подстанции. Однако необходимость численного определения параметров цепочек для конкретных условий и длин отрезков линий несколько затрудняет его применение. Формульное решение этой задачи можно получить при использовании приближенного выражения для функции искажения [3]

$$\varphi(p) = e^{-a_s x \sqrt{p}}, \quad (8)$$

где a_s – коэффициент для земляного канала трехпроводной линии. Для однопроводной линии можно воспользоваться выражением [1]

$$a = \frac{\sqrt{\mu_0 \rho_z}}{6\pi h z_g}, \quad (9)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость, ρ_z – сопротивление земли (100-300 Ом/м), h – средняя высота подвеса.

Производя в (8) подстановку

$$p' = a^2 x^2 p, \quad (10)$$

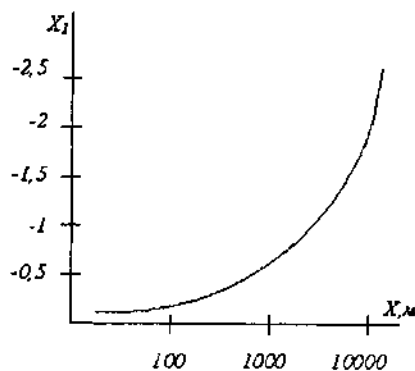
получим

$$\varphi(p') = e^{-\sqrt{p'}} \rightarrow 1 - \Phi\left(\frac{1}{2\sqrt{t'}}\right), \quad (11)$$

где

$$t' = \frac{t}{a^2 x^2}, \text{ а } y = \frac{1}{2\sqrt{t}} \quad (12)$$

– аргумент интеграла вероятности $\Phi(y)$.



Р и с. 2. Зависимость корня x_1 от длины пробега x

Теперь, используя метод «мнимых частот», определим параметры эквивалентной цепочки искажения для изображения $\varphi(p')$. Формально в этом случае коэффициенты полинома λ_1, λ_2 и корни x_1, x_2 , определенные при решении (7), должны оставаться постоянными при любых a и x . Здесь следует учитывать, что функции искажения, определенные по формулам (8) и (11), дают несколько преувеличенную деформацию волны [1, 2]. Поэтому при расчете необходимо вводить соответствующую коррекцию, которая окончательно выражается в зависимости корня x_1 от длины пробега x . График $x_1 = f(x)$ представлен на рис. 2. Практика

расчетов показывает, что x_2 при этом может оставаться постоянным ($x_2 \approx 15$).

Нетрудно заметить, что при применении для вычисления оригинала (3) метода подкасательной [4] можно использовать x_1 и x_2 в качестве смещения подкасательной, произведя предварительно пересчет для реальной длины отрезка линии по формулам, вытекающим из (10) и (12):

$$\begin{aligned}x'_1 &= x_1 \cdot \frac{1}{a^2 x^2} \cdot 10^{-6} \text{ мсек}, \\x'_2 &= x_1 \cdot \frac{1}{a^2 x^2} \cdot 10^{-6} \text{ мсек}.\end{aligned}\quad (13)$$

Сравнение результатов показывает возможность использования описанной методики для приближенного определения деформации волн вследствие влияния сопротивления земли при расчётах перенапряжения непосредственно на подстанции. Следует заметить, что функция искажения рассчитывается для прямоугольной и единичной волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2004 – 368 с. – (Серия «Учебники НГТУ».)
2. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. – Ленинград: Наука, 1988. – 303 с.
3. Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И. Анализ надежности грозозащиты подстанций. – Л.: Наука, 1981. – 126 с.
4. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление и его приложения к задачам электротехники. Изд. 2 доп., Л.: Энергия, 1972. – 360 с.

Статья поступила в редакцию 3 июня 2009 г.

UDC 621.311.1.018

DETERMINATION OF OVERVOLTAGES, APPEARS ON SUBSTATION EQUIPMENT

A.S. Gneushev, A.S. Dobrosotkich, L.G. Migunova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

Questions of overvoltages determination with taking into account the waves fading and deformation are considered. Worded method let realized on computer the waves deformation determination at the expense of earth influence with spread them on lines section, connecting circuit nodes of substation.

Key words: *overvoltages, waves deformation, distortion function, original, Carson's Integral.*