

**Л.В. Бьюлей**

**Волновые процессы в линиях  
передачи и трансформаторах**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
Л11

Л11 **Л.В. Бьюлей**  
Волновые процессы в линиях передачи и трансформаторах / Л.В. Бьюлей –  
М.: Книга по Требованию, 2022. – 288 с.

**ISBN 978-5-458-57026-8**

Волновые процессы на линиях передачи. Возникновение, распространение и деформация волн. Теория распространения волн в однопроводной системе. Типичные случаи распространения волн в однопроводной системе. Искажение и затухание волн. Многократные отражения волн. Схемы защиты. Распространение волн в многопроводной системе. Преломление волн в многопроводной системе. Метод разложения волн на составляющие. Волны атмосферного происхождения. Заземленные тросы. Дуговые заземления и коммутационные перенапряжения. Переходные процессы внутри обмоток трансформаторов и на их концах. Общая классификация вопросов, связанных с явлениями переходного режима в трансформаторах. Идеальный двухобмоточный трансформатор. Свободные колебания в первичной обмотке. Волны произвольной формы, набегаящие на трансформатор с одного или обоих концов его обмотки. Напряжение переходного режима на концах обмоток. Уничтожение внутренних колебаний при помощи электростатического экрانا.

**ISBN 978-5-458-57026-8**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2022

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2022

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



**ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ****ВВЕДЕНИЕ****ВОЗНИКНОВЕНИЕ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИЯ ВОЛН**

Стремление энергоснабжающих обществ к уменьшению числа аварий в электрических системах и сохранению бесперебойности их работы привлекло внимание в защите линий передач и станционной аппаратуры от грозовых перенапряжений как основной причины, вызывающей нарушение нормального режима эксплуатации. В течение последних лет вопросы грозовых перенапряжений были изучены достаточно полно, и в настоящее время найдены рентабельные средства для практически полной защиты установок от грозовых перенапряжений.

Ниже приведена диаграмма, показывающая схему рабочих процессов по исследованию грозовых перенапряжений. В задачи лаборатории при этом входит: разработка средств, необходимых для производства контроля и измерения искусственной молнии, и изучение влияния импульсов на изоляцию и аппаратуру.

Полевые исследования могут быть подразделены на экспериментальные и статистические. Экспериментальное изучение производится или в полевых лабораториях, сооружаемых в важнейших пунктах на линиях передачи, или при помощи портативных импульсных генераторов и катодных осциллографов с необходимым вспомогательным оборудованием, перевозимых на автомобилях или по железной дороге в заранее выбранное место, где можно произвести соответствующие опыты. Имел место, например, случай, когда железнодорожным вагоном, который был оборудован катодным осциллографом, пользовались как передвижной лабораторией в целях изучения перенапряжений на линии передачи, проходящей параллельно электрофицированной железной дороге.

Статистические полевые исследования заключаются в наблюдениях за числом, интенсивностью и путями грозовых штормов, высотой и размерами облаков, а также в фотографировании грозовых разрядов. Многие эксплуатирующие компании собирают детальные материалы о всех нарушениях режима эксплуатации в системе и производят их сопоставление с известными или вероятными причинами этих нарушений.

Таким путем могла быть дана оценка работы защитного оборудования, находившегося в установках, и определены данные о надежности работы аппаратуры и изоляции.



Основной целью данной книги является теоретический анализ явлений в электрических системах преимущественно при грозовых перенапряжениях. Большая часть книги посвящена изучению теории волн и касается условий их возникновения, распространения и деформации в электрических системах. Для большинства случаев применима теория распространения волн в однопроводной системе, обратным проводом которой служит земля. Имеются, однако, случаи, когда необходимо считаться с присутствием соседних проводов и рассматривать взаимодействие между ними. Диаграмма, приведенная на стр. 7, содержит схему изложения теории электромагнитных волн, принятую в этой книге. В гл. I даются основные законы для однопроводных систем. В гл. II дано применение этих законов к ряду типичных случаев. В гл. III изложены вопросы затухания и искажения волн, а также приведены некоторые полуэмпирические формулы для определения затухания волн. В гл. IV разбирается принцип суперпозиции и его применение для расчета прямых или обратных отражений. В гл. IV разбираются различные схемы защиты

ты линий передачи от перенапряжений. Первые пять глав посвящены, таким образом, теории распространения волн в однопроводной системе.



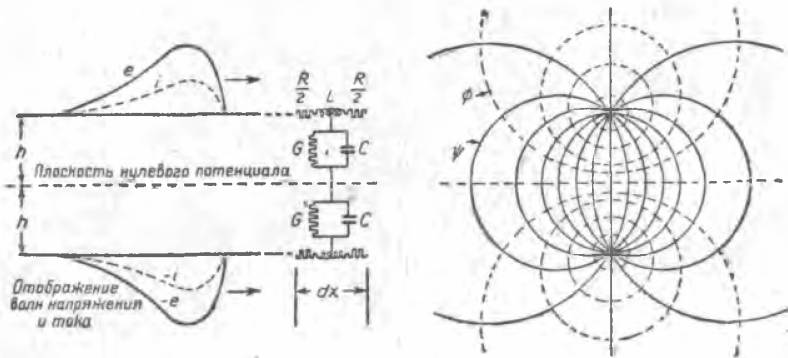
Гл. VI посвящена основным законам распространения волн в многопроводной системе. В гл. VII приведены методы подсчета преломления и отражения волн в узлах. В гл. VIII излагается метод разложения волн на составляющие аналогично методу симметричных координат в

многофазных системах. В гл. IX и X излагается расчет явлений, вызываемых грозовыми разрядами. Гл. XI дает сведения по теории дугowych и коммутационных перенапряжений и заканчивает первую часть книги.

## ГЛАВА I

### 1. ТЕОРИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ОДНОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ

В теории однопроводных систем принимается, что электромагнитные процессы протекают в одной паре проводников и окружающей их среде. При этом один из проводников может быть, а обычно и является зеркальным отражением другого в эквипотенциальной плоскости — земной



Фиг. 1. Электромагнитные волны и связанные с ним электромагнитные поля.

поверхности. При изучении явлений распространения волн обычно принимают поверхность почвы нормальной проводимости за поверхность нулевого потенциала.

На фиг. 1 показаны волны в простой двухпроводной цепи. С волной напряжения  $e$  связан электростатический поток  $\phi$ , а с волной тока  $i$  — электромагнитный поток  $\psi$ , так что для каждого элемента линии  $dx$  можно написать следующие уравнения:

$$d\phi = iL dx, \quad (1)$$

$$d\psi = eC dx, \quad (2)$$

где  $L$  — коэффициент самоиндукции, а  $C$  — емкость одного провода на единицу длины линии по отношению к плоскости нулевого потенциала. Падение напряжения на элементе  $dx$ , вызванное электромагнитным потоком  $d\phi$ , будет  $-\frac{\partial(d\phi)}{\partial t}$ , падение напряжения вследствие активных потерь в проводнике —  $iR dx$  и общее падение напряжения в направлении положительных значений  $x$ :

$$-de = -\frac{\partial e}{\partial x} dx = iR dx + \frac{\partial}{\partial x}(d\psi) = \left(R + L \frac{\partial}{\partial t}\right) i dx. \quad (3)$$

Ток смещения, вызываемый электростатическим потоком  $\phi$  на длине  $dx$ , будет  $-\frac{\partial}{\partial t}(d\phi)$ . Чтобы получить общее изменение тока в направлении положительных значений  $x$ , к току смещения следует прибавить ток утечки  $-eG dx$ , так что

$$-di = -\frac{\partial i}{\partial x} dx = -eG dx + \frac{\partial}{\partial t}(d\phi) = \left(G + C \frac{\partial}{\partial t}\right) e dx, \quad (4)$$

деля уравнения (3) и (4) на  $dx$ , получим

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = \left(R + L \frac{\partial}{\partial t}\right) i = Z(p) i, \quad (5)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = \left(G + C \frac{\partial}{\partial t}\right) e = Y(p) e, \quad (6)$$

где  $p = \frac{\partial}{\partial t}$ . Уравнения (5) и (6) суть хорошо известные дифференциальные уравнения однофазной линии передачи. Дифференцируя уравнение (5) по  $x$  и подставляя результат в (6), имеем

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = -Z(p) \frac{\partial i}{\partial x} = Y(p) Z(p) e = [RG + (RC + GL)p + LCp^2] e, \quad (7)$$

а дифференцируя уравнение (6) по  $x$  и подставляя результат в (5), получим

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = -Y(p) \frac{\partial e}{\partial x} = Z(p) \cdot Y(p) i = [RG + (RC + GL)p + LCp^2] i. \quad (8)$$

Таким образом дифференциальные уравнения для напряжения и для тока являются подобными, поэтому решения их будут отличаться только постоянными. Способ решения этих уравнений, известных в математической физике как телеграфные уравнения, был дан много лет назад Хевисайдом и Пуанкаре; эти уравнения довольно широко применяются в настоящее время в электротехнической литературе<sup>1</sup>. Решая уравнения (7) и (8) как обычные дифференциальные уравнения относительно  $x$ , получим

$$e = \varepsilon^{x\sqrt{ZY}} f_1(t) + \varepsilon^{-x\sqrt{ZY}} f_2(t), \quad (9)$$

$$i = -Y \int e dx = -\sqrt{\frac{Y}{Z}} [\varepsilon^{x\sqrt{ZY}} f_1(t) - \varepsilon^{-x\sqrt{ZY}} f_2(t)], \quad (10)$$

где  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  — постоянные интегрирования только по  $x$ ; они могут быть поэтому функциями  $t$ .

Уравнения (9) и (10) являются общим решением дифференциальных уравнений (7) и (8), однако в такой форме они трудно анализируются ввиду наличия радикала

$$\sqrt{ZY} = \sqrt{LC \left[ \frac{RG}{LC} + \left( \frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right) p + p^2 \right]}. \quad (11)$$

<sup>1</sup> См., например, Steinmetz, Transient Electric Phenomena and Oscillations.

Хевисайд указал, что если  $RC=GL$ , то радикал упрощается:

$$\sqrt{ZY} = \sqrt{LC \left(p + \frac{R}{L}\right)^2} = \sqrt{LC} \left(p + \frac{R}{L}\right), \quad (12)$$

если пренебречь потерями, то

$$\sqrt{ZY} = \sqrt{LC} p. \quad (13)$$

По теореме Тейлора

$$\begin{aligned} f(t+a) &= f(t) + af'(t) + \frac{a^2}{\underline{1} \cdot 2} f''(t) + \dots = \\ &= \left(1 + ap + \frac{a^2}{\underline{1} \cdot 2} p^2 + \dots\right) f(t) = \varepsilon^{ap} f(t). \end{aligned} \quad (14)$$

Сравнивая (9) и (10) с (14) и принимая во внимание (12), получим

$$e = \varepsilon^{\sqrt{CL} \left(\frac{R}{L}\right) x} f_1(t + \sqrt{CL} x) + \varepsilon^{-\sqrt{CL} \left(\frac{R}{L}\right) x} f_2(t - \sqrt{CL} x), \quad (15)$$

$$i = -\sqrt{\frac{C}{L}} \left[ \varepsilon^{\sqrt{CL} \left(\frac{R}{L}\right) x} f_1(t + \sqrt{CL} x) - \varepsilon^{-\sqrt{CL} \left(\frac{R}{L}\right) x} f_2(t - \sqrt{CL} x) \right], \quad (16)$$

если пренебречь потерями ( $R=0$ ), то

$$e = f_1(t + \sqrt{CL} x) + f_2(t - \sqrt{CL} x), \quad (17)$$

$$i = -\sqrt{\frac{C}{L}} [f_1(t + \sqrt{CL} x) - f_2(t - \sqrt{CL} x)]. \quad (18)$$

Функция  $f(t \pm \sqrt{CL} x)$  представляет собой движущуюся волну, потому что любому значению  $t$  может быть найдено такое значение  $x$ , что  $f(t \pm \sqrt{CL} x)$  будет иметь одну и ту же величину. Соответствующие величины  $x$  и  $t$ , определяющие одну и ту же точку волны, находятся из уравнений

$$\left. \begin{aligned} t - \sqrt{CL} x &= \sqrt{CL} \lambda_2 \text{ (прямая волна),} \\ t + \sqrt{CL} x &= \sqrt{CL} \lambda_1 \text{ (обратная волна);} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

скорость распространения

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} = \frac{+1}{\sqrt{CL}} \text{ (прямая волна),} \\ v &= \frac{dx}{dt} = \frac{-1}{\sqrt{CL}} \text{ (обратная волна).} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Таким образом ток и напряжение распространяются в виде волн и могут состоять из прямой волны  $f_2$ , движущейся по направлению положительного  $x$ , и обратной волны  $f_1$ , движущейся в направлении отрицательного  $x$ , причем обе волны имеют одинаковую скорость распространения  $v = \frac{1}{\sqrt{CL}}$  при параллельных воздушных проводах, расстояние между которыми значительно больше радиусов; постоянные  $L$  и  $C$  для

одного провода равны

$$L = \left( \frac{1}{2} + 2 \ln \frac{2h}{r} \right) 10^{-9} \text{ Н/см}, \quad (21)$$

$$C = \frac{10^{-11}}{\left( 18 \ln \frac{2h}{r} \right)} \text{ Ф/см}, \quad (22)$$

где  $2h$  — расстояние между проводами, а  $r$  — радиус провода. Пренебрегая величиной  $1/2$  в уравнении (21), имеем

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек} = 300 \text{ м/μ сек} \quad (23)$$

— равно скорости распространения света в пустоте.

Обычно  $t$  измеряется в  $\mu$  сек, а  $x$  в км. Тогда  $v = 0,3 \text{ км/μ сек}$ .

В случае если имеется кабель с сплошным внутренним проводником радиуса  $r$  и внешним полым цилиндрическим проводником радиуса  $R$  с изоляцией между ними, имеющей диэлектрическую постоянную  $k$ , то

$$L = \left( 2 \ln \frac{R}{r} + \frac{1}{2} + \frac{r^2}{3R^2} - \frac{r^4}{12R^4} + \frac{r^6}{30R^6} - \dots \right) 10^{-9}, \quad (24)$$

$$C = \frac{k \cdot 10^{-11}}{18 \ln \frac{R}{r}}. \quad (25)$$

Пренебрегая в выражении для  $v$  всеми членами за исключением первого, будем иметь

$$v \approx \frac{3 \cdot 10^{10}}{\sqrt{k}} \text{ см/сек}. \quad (26)$$

Обычно в кабелях  $k$  имеет величину порядка  $2,5 \div 4$ , так что скорость распространения волн в них получается равной  $1/2 \div 2/3$  от скорости света.

Подставляя уравнение (19) в (15) и (16), получим

$$e = \varepsilon \left( -\frac{R}{L} \right)^t \left\{ \varepsilon \left( \frac{R}{L} \right)^{\nu \sqrt{CL}} f_1(\sqrt{CL} \lambda_1) + \varepsilon^{-\left( \frac{R}{L} \right)^{\nu \sqrt{CL}}} f_2(\sqrt{CL} \lambda_2) \right\} = \\ = \varepsilon \left( -\frac{R}{L} \right)^t \left\{ f_3(\lambda_1) + f_4(\lambda_2) \right\} = \quad (27)$$

$$= \varepsilon \left( -\frac{R}{L} \right)^t \left\{ f_3(x + vt) + f_4(x - vt) \right\}, \quad (28)$$

$$i = \varepsilon \left( \frac{R}{L} \right)^t \left\{ -f_3(x + vt) + f_4(x - vt) \right\} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (29)$$

Таким образом декремент затухания может быть выражен в виде пространственного декремента затухания в уравнениях (15) и (16) или в виде временного декремента затухания в уравнениях (28) и (29). В начальный момент при  $t=0$  имеем

$$e = \varepsilon \left( \frac{R}{L} \right)^{\nu \sqrt{CL}} x f_1(x) + \varepsilon^{-\nu \sqrt{CL}} \left( \frac{R}{L} \right)^x f_2(x) = f_3(x) + f_4(x). \quad (30)$$

Отсюда видно, что если распределение напряжения вдоль провода определяется для  $t=0$ , то удобнее пользоваться уравнением (28) вместо (15). В этом случае форма волны будет такая же, как в начальном распределении, тогда как при пользовании уравнением (15) необходимо разделить ординаты начального распределения на экспоненциальную функцию. С другой стороны, если форма волны известна для  $x=0$  в функции времени, то удобнее пользоваться формулой (15).

Из уравнений (28) и (29) видно, что между волнами тока и напряжения существует следующее соотношение:

$$\left. \begin{aligned} e &= +i \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{или} \quad i = e \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{для прямой волны,} \\ e &= -i \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{или} \quad i = -e \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{для обратной волны.} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Величина  $\sqrt{\frac{L}{C}} = z$  называется волновым импеданцем линии, а величина, обратная ей,  $\sqrt{\frac{C}{L}} = y$  — волновой проводимостью линии. Эти величины имеют размерность сопротивления и проводимости и, следовательно, измеряются в омах и мо. Нужно заметить, что получаемые таким образом величины не зависят от длины линии.

Интересно отметить следующее тождество:

$$z = \frac{1}{y} = \sqrt{\frac{L}{C}} = vL = \frac{1}{vC}. \quad (32)$$

Таким образом если известно  $L$ , то  $C = \frac{1}{v^2 L}$  и  $z = vL$ , эти соотношения имеют практическое значение во многих случаях, где не удается определить по тем или иным причинам отдельно  $L$ ,  $C$  и  $v$ . То обстоятельство, что решения, полученные в (28) и (29), содержат прямую и обратную волны, не означает, что в действительности всегда должны существовать обе волны, каждая волна сама по себе является решением дифференциального уравнения, и если одна волна удовлетворяет линейным условиям, то, естественно, вторая волна может не входить в решение. При этом нужно иметь в виду, что подобное решение не удовлетворяет всем условиям работы линии, а соответствует какому-либо частному случаю.

Уравнения (28) и (29) удовлетворяют дифференциальным уравнениям при любых значениях функции  $f_3$  и  $f_4$ , поэтому общее решение дифференциальных уравнений будет

$$e = \varepsilon^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \sum [f_3(x+vt) + f_4(x-vt)], \quad (33)$$

$$i = y \varepsilon^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \sum [-f_3(x+vt) + f_4(x-vt)]. \quad (34)$$

Это решение основано на предположении, что  $RC=GL$ . Линии, постоянные которых удовлетворяют этому условию, названы Хевисайдом линиями без искажения.

При этом условии и при отсутствии потерь волна будет распространяться вдоль линии без искажения и затухания. На линиях связи обычно включаются через определенные интервалы дроссели так, чтобы постоянные линии удовлетворяли условию  $RC=GL$ . Благодаря этому уменьшается искажение передачи. В линиях передачи искажение всегда имеет место, однако опыт показывает, что искажением волны можно пренебречь, а затухание может быть учтено декрементом затухания. В теории линий передач предполагается, что  $R, L, G$  и  $C$  — величины постоянные, в действительности они изменяются в широких пределах в зависимости от напряжения и формы волны. Так, например, с увеличением крутизны фронта волны сопротивление  $R$  увеличивается, а индуктивность  $L$  уменьшается, потому что благодаря влиянию скин-эффекта ток вытесняется с внутренних частей на периферию проводника. С образованием короны, когда напряжение достигает критической величины, увеличиваются как проводимость  $G$ , так и емкость  $C$ . Закон изменения  $G$  и  $C$  пока не установлен, но если бы он и был известен, нет основания полагать, что дифференциальное уравнение линии передач тогда было бы решено, а если оно и было бы решено, то пользование этим решением для инженерных вычислений вряд ли было бы возможно из-за его сложности. Поэтому нет основания считать, что рассмотрение условий искажения волны при постоянных  $R, L, G$  и  $C$  заслуживает внимания хотя бы с точки зрения задач нашего труда.

Величина энергии соответствующей волны напряжения и тока может быть найдена из уравнения (31):

$$\begin{aligned} W &= W_e + W_i = \frac{C}{2} \int e^2 dx + \frac{L}{2} \int i^2 dx = \frac{C}{2} \int e^2 dx + \frac{L}{2} \int \frac{C}{L} e^2 dx = \\ &= C \int e^2 dx = L \int i^2 dx = \sqrt{LC} \int ei dx, \end{aligned} \quad (35)$$

интегрируя по времени, получим

$$W = \int ei dt = \sqrt{\frac{C}{L}} \int e^2 dt = \sqrt{\frac{L}{C}} \int i^2 dt. \quad (36)$$

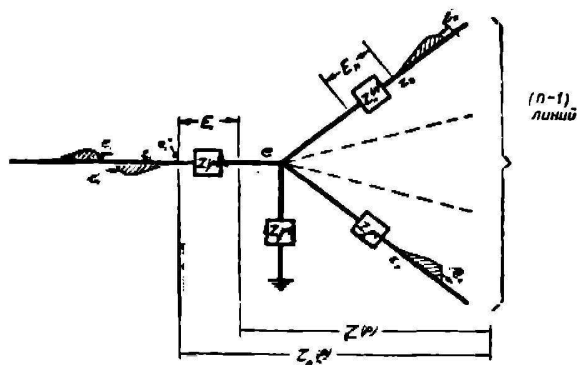
В уравнениях (35) и (36) интегрирование производится по всей длине волны, причем оба уравнения взаимозаменяемы, так как  $v dt = dx$  (20). Они показывают, что полная энергия волны делится поровну на электростатическую и электромагнитную, т. е.

$$\begin{aligned} W_e &= \frac{C}{2} \int e^2 dx = \frac{W}{2}, \\ W_i &= \frac{L}{2} \int i^2 dx = \frac{W}{2}. \end{aligned}$$

**Преломление и отражение волн.** Когда волна достигает точки, где резко изменяются постоянные линии, например, короткозамкнутый конец, разомкнутый конец, соединение с другой линией и т. д., часть

волны отразится назад, а часть может перейти на другие секции цепи. Начальная волна обычно называется падающей волной, в точках перехода она разделяется на две волны — отраженную и проходящую или преломленную. Образование этих волн в точках перехода определяется законом Кирхгофа и удовлетворяет дифференциальным уравнениям линии передач и принципу сохранения энергии.

Предположим, что к линии приключен импеданс, состоящий из сопротивления, индуктивности, емкости и нескольких линий передачи.



Фиг. 2. Обобщенная узловая точка.

Пусть уравнение импеданса, написанное в операционной форме, будет  $Z_0(p)$ , примем точку перехода за начало координат и будем считать, что падающая волна движется в положительном направлении. Согласно (31) ток и напряжение падающей волны будут иметь один и тот же знак. Обозначим ток и напряжение падающей волны через  $i$

и  $e$  и отраженной волны — через  $i'$  и  $e'$  и преломленной волны — через  $i''$  и  $e''$ . Тогда на основании (31) потенциал в точке перехода будет

$$e_0 = e + e' = (i + i') Z_0(p) = (e - e') y Z_0(p), \quad (37)$$

где

$$y = \frac{1}{z} = \sqrt{\frac{C}{L}} = \text{волновая проводимость.}$$

Решая это уравнение относительно  $e'$ , получим

$$e' = \left[ \frac{Z_0(p) - z}{Z_0(p) + z} \right] e. \quad (38)$$

Результирующая волна в точке перехода будет равна

$$e_0 = e + e' = \left[ \frac{2Z_0(p)}{Z_0(p) + z} \right] e, \quad (39)$$

$$i_0 = i + i' = y(e - e') = \left[ \frac{2}{Z_0(p) + z} \right] e. \quad (40)$$

На фиг. 2 показан один из наиболее общих случаев перехода на линиях передачи. Когда падающая волна  $e_1$ , двигаясь вдоль линии с импедансом  $z_1$ , достигает узла, возникает отраженная волна  $e_1'$ , двигающаяся обратно в линию  $z_1$ , и преломленные волны  $e_2'', \dots, e_n''$ , перемещающиеся по линиям передачи с импедансами  $z_2$  до  $z_n$ , при этом в переходной точке установится потенциал  $e$ .