

Уравнение однородной линии при согласованных нагрузках

При согласованных нагрузках $Z_0 = Z_\ell = Z_B$ и $U_0/U_\ell = I_0/I_\ell = Z_B$ ранее полученные уравнения упрощаются и их можно записать в следующем наиболее часто используемом на практике в виде

$$U_0/U_\ell = e^{\gamma\ell}; \quad I_0/I_\ell = e^{\gamma\ell}.$$

Таким образом, распространение энергии по линии, ток и напряжение в любой точке цепи обусловлены двумя параметрами γ и Z_B , которые широко используются для оценки эксплуатационно-технических качеств линий связи.

Волновое сопротивление

Волновое сопротивление Z_B – это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной линии без отражения, т.е. при условии, что на процесс передачи не влияют несогласованности на концах линии.

Электромагнитную волну можно представить в виде двух волн: волны напряжения, соответствующей электрической энергии, и волны тока, соответствующей магнитной энергии. Количественное соотношение, имеющее место между этими волнами в линии, и есть волновое сопротивление цепи.

Волновое сопротивление свойственно данному типу кабеля и зависит лишь от его первичных параметров и частоты передаваемого тока

$$Z_B = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}.$$

По своей физической природе величина Z_B не зависит от длины кабельной линии и постоянна в любой точке цепи.

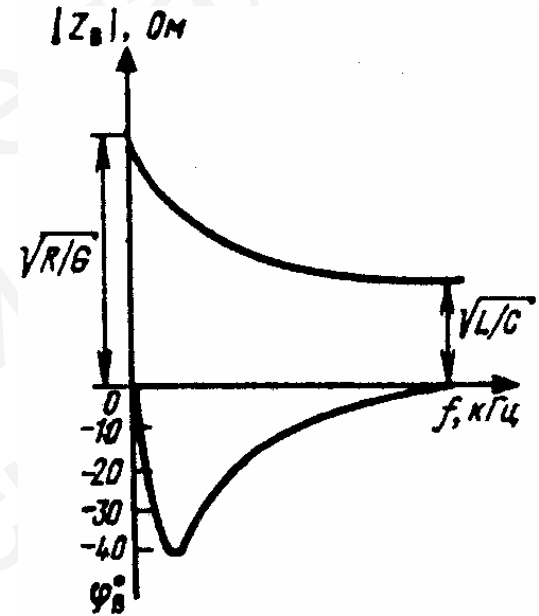
В общем виде волновое сопротивление является комплексной величиной и может быть также выражено через его действительную и мнимую части:

$$Z_B = |Z_B| e^{j\phi_B}.$$

Общий вид частотной зависимости волнового сопротивления цепи кабеля имеет вид.

Модуль волнового сопротивления Z_B с изменением частоты уменьшается от значения $\sqrt{R/G}$ при ($f = 0$) до $\sqrt{L/C}$ и сохраняет эту величину во всей области высоких частот.

Угол волнового сопротивления φ_B равен нулю при $f = 0$ и на высоких частотах, а на средних частотах ($f = 800$ Гц) имеет максимальное значение. В кабельных линиях угол всегда отрицателен и по абсолютной величине не превышает 45° , что свидетельствует о преобладании емкостной составляющей и емкостном характере волнового сопротивления кабелей.



Коэффициент распространения

Электромагнитная энергия, распространяясь вдоль кабельной линии, уменьшается по величине от начала к концу линии. Уменьшение или затухание энергии объясняется потерями ее в цепи передачи. Эти потери учитываются при помощи коэффициента распространения γ .

Коэффициент распространения является комплексной величиной и может быть представлен в виде суммы действительной и мнимой части:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}.$$

Если воспользоваться выражением для тока и напряжения в виде

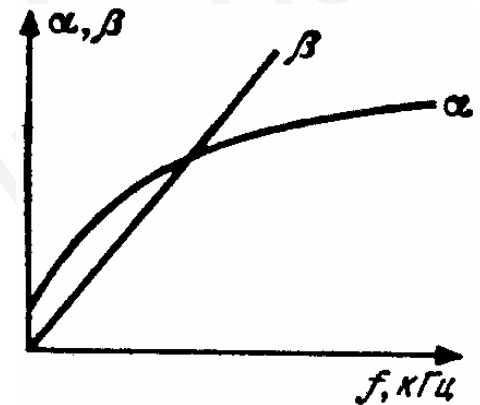
$$U_0/U_\ell = I_0/I_\ell = e^{\gamma\ell} = e^{\alpha\ell} e^{j\beta\ell} = Ae^{j\varphi},$$

то можно видеть, что модуль выражения $A = e^{\alpha\ell}$ характеризует уменьшение абсолютного значения тока или напряжения при прохождении по линии длиной ℓ . Угол $\varphi = \beta\ell$ характеризует изменение угла векторов тока или напряжения на этом же участке линии длиной ℓ .

При передаче сигналов связи параметры α и β характеризуют, соответственно, затухание и изменение фаз тока, напряжения и мощности на участке кабельной цепи длиной 1 км и называются *коэффициентом затухания* и *коэффициентом фазы*. Коэффициент затухания измеряется в дБ/км, а коэффициент фазы – в рад/км.

Типовые частотные зависимости коэффициента затухания и коэффициента фазы кабеля имеют следующий вид.

Коэффициент затухания α , равный при постоянном токе \sqrt{RG} , вначале возрастает резко, а затем более плавно. Коэффициент фазы β растет от нуля почти по прямолинейному закону.



Скорость распространения электромагнитной энергии по цепям связи

Электромагнитная энергия распространяется по линии с определенной скоростью, которая зависит от параметров цепи и частоты тока и определяется как

$$v = \omega/\beta.$$

Скорость распространения является функцией частоты $f = \omega/2\pi$ и коэффициента фазы β . Таким образом, если затухание цепи определяет качество и дальность связи, то коэффициент фазы обуславливает скорость движения энергии по линии.

Скорость распространения можно определить:

при постоянном токе как

в диапазоне высоких частот как

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC} \left[\left(\sqrt{LG/RC} + \sqrt{RC/LG} \right) / 2 \right]};$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Таким образом, с возрастанием частоты скорость распространения электромагнитной энергии по кабельным линиям существенно возрастает.

Свойства неоднородных линий

Рассмотренная ранее кабельная линия была однородна по своим электрическим характеристикам на всем протяжении и нагрузки на ее концах были согласованы ($Z_0 = Z_\ell = Z_B$), поэтому ее сопротивление в любой точке было одинаково и равно волновому.

В такой линии отраженных электромагнитных волн нет, и вся передаваемая энергия, полностью поглощается приемником, электрические процессы описываются упрощенными уравнениями, а затухание полностью определяется ее собственным.

Такое состояние линии наиболее благоприятно для прохождения сигналов связи, и его стремятся создать в практике устройства магистралей связи большой протяженности.

Значительно более сложные электромагнитные процессы возникают в *неоднородных линиях* и при *несогласованных нагрузках*.

В местах электрических несоответствий возникают отраженные волны, за счет которых создаются обратный и попутный потоки. В связи с этим:

- в приемник поступает лишь часть энергии, по абсолютной величине меньшая, чем при согласованной нагрузке;
- отраженные волны искажают частотную характеристику собственного волнового сопротивления кабеля;
- электрическое состояние линии характеризуется не волновым, а входным сопротивлением $Z_{вх}$;
- дальность связи определяется не собственным затуханием линии, а ее рабочим затуханием a_p – суммарной величиной, включающей, кроме собственного затухания кабеля, также затухание за счет неоднородности электрических характеристик цепи.

Количественное соотношение между поступившей к приемнику и отраженной от него энергией зависит от соотношений сопротивлений приемника Z_ℓ и волнового Z_B и характеризуется *коэффициентом отражения*:

$$\rho = (Z_\ell - Z_B) / (Z_\ell + Z_B).$$

При согласованной нагрузке ($Z_\ell = Z_B$) коэффициент отражения превращается в нуль и энергия полностью поглощается приемником. При замыкании конца цепи накоротко ($Z_\ell = 0$) и при холостом ходе ($Z_\ell = \infty$) коэффициент отражения соответственно равен -1 и $+1$.

Линии с несогласованными нагрузками

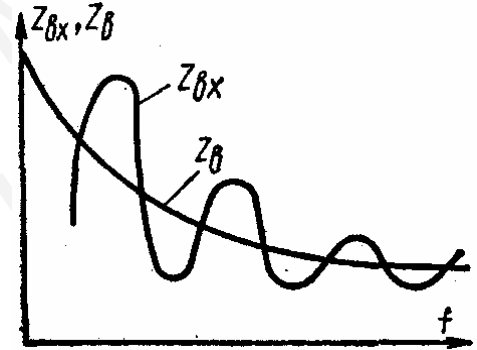
Входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ – сопротивление, измеренное на входе линии при любом нагрузочном сопротивлении на ее конце:

$$Z_{\text{вх}} = U_0 / I_0 = Z_B \operatorname{th}(\gamma \ell + n),$$

$$\text{где } \operatorname{th}(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}); \quad n = \frac{1}{2} \ln \frac{Z_\ell + Z_B}{Z_\ell - Z_B} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{\rho}.$$

Если линия имеет согласованную нагрузку ($Z_\ell = Z_B$), то коэффициент отражения $p = 0$ и $Z_{BX} = Z_B$. Для электрически длинной линии ($\ell \rightarrow \infty$) при любой нагрузке на ее конце $Z_{BX} = Z_B$.

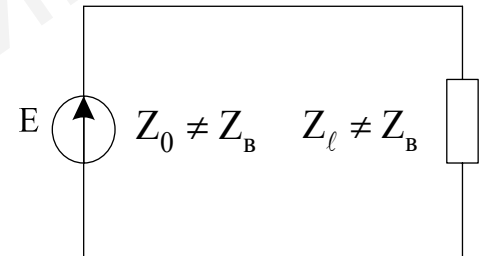
Зависимость входного сопротивления от частоты при $Z_{BX} = 2Z_B$ имеет вид.



Рабочее затухание a_p – затухание цепи при любых нагрузочных сопротивлениях (Z_0 и Z_ℓ) на концах

$$a_p = \alpha \ell + \ln \left| \frac{Z_0 + Z_B}{2\sqrt{Z_0 Z_B}} \right| + \ln \left| \frac{Z_\ell + Z_B}{2\sqrt{Z_\ell Z_B}} \right| + \ln |1 - p_1 p_2 e^{-2\gamma \ell}|,$$

где $p_1 = (Z_0 - Z_B)/(Z_0 + Z_B)$; $p_2 = (Z_\ell - Z_B)/(Z_\ell + Z_B)$.



Первое слагаемое выражает собственное затухание кабеля; второе и третье – дополнительные затухания вследствие несогласованности сопротивлений генератора и кабеля, а также приемника и кабеля; четвертое слагаемое равно дополнительному затуханию от взаимодействия несогласованностей в начале и конце линии.

Если обеспечить согласование нагрузочных сопротивлений в начале и конце линии ($Z_0 = Z_\ell = Z_B$), то в этом случае останется лишь первое слагаемое и рабочее затухание окажется равным собственному.

Линии неоднородные по длине

Реальный кабель можно рассматривать как неоднородную цепь, составленную из отдельных (строительных) участков. Электромагнитная волна, распространяясь по такому кабелю и встречая на своем пути неоднородность, частично отражается от нее и возвращается к началу линии.

Неоднородность кабеля сказывается, главным образом, на его волновом сопротивлении, величина которого на участках неоднородности отличается от номинальной, поэтому неоднородность учитывается через коэффициент отражения:

$$\rho = (Z'_B - Z_B) / (Z'_B + Z_B),$$

где Z_B и Z'_B – волновые сопротивления соседних участков кабеля.

Различают неоднородности:

- *внутренние* – в пределах строительной длины кабеля;
- *стыковые* – обусловленные различием характеристик сопрягаемых строительных участков.

Стыковые неоднородности, как правило, превышают внутренние.

При наличии нескольких неоднородных участков волна претерпевает серию частичных отражений и, циркулируя по линии, вызывает дополнительное затухание и искажение характеристик цепи.

Неоднородности в кабеле приводят к появлению в цепи двух дополнительных потоков энергии:

– *обратного*, состоящего из суммы элементарных отраженных волн в местах неоднородностей и движущегося к началу цепи;

– *попутного*, возникающего по закону двойных отражений, вследствие того, что первоначально отраженные волны, движущиеся к началу цепи, встречая места неоднородностей, частично отражаются и направляются к концу линии.

Обратный поток приводит к колебаниям входного сопротивления кабеля $Z_{вх}$, что затрудняет согласование кабеля с аппаратурой на концах линий и вызывает искажения в цепи передачи. Попутный поток искажает форму передаваемого сигнала и также создает помехи при передаче.

