

УДК 621.316.97

С. Л. КУРИЛИН, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

О КОМПЛЕКСНОМ ПОКАЗАТЕЛЕ ДОБРОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Предложен показатель эффективности передачи электроэнергии и электрических сигналов, выведенный через первичные параметры электрических линий.

Системы электроснабжения, электротехнология, а также проводная электрическая связь используют электромагнитные колебания для перемещения энергии по электрической линии в виде волн. При этом индуктивность и ёмкость электрической линии обеспечивают продвижение энергии колебаний; они распределены вдоль линии; для их учёта используют километрические единицы измерения L_0 [Гн / км] и C_0 [Ф / км]. Сопротивление проводов (жил кабелей) r_0 [Ом / км] и проводимость изоляции g_0 [Ом / км] также распределены вдоль линии, они вызывают потери энергии и затухание колебаний. Распространение по электрической линии энергии в виде волны с частотой $\omega = 2\pi f$ характеризуется коэффициентом распространения

$$\gamma = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta,$$

где α – километрический коэффициент затухания, Нп/км; β – километрический коэффициент фазы, рад/км.

Введём понятие добротности q и угла потерь δ для характеристики проводников, изоляции и линии в целом (напомним, что понятием добротность характеризуют способность резонансных контуров поддерживать и усиливать электрические колебания, то есть добротность является величиной, обратной показателю затухания электрических колебаний). Добротность проводников представим как распространение понятия добротности катушки на протяжённую линию и выразим через угол потерь δ_L энергии в проводниковом материале, а добротность изоляции представим как величину, обратную тангенсу угла диэлектрических потерь δ_C :

$$q_L = \omega L_0 / r_0 = 1 / \operatorname{tg} \delta_L; \quad q_C = \omega C_0 / g_0 = 1 / \operatorname{tg} \delta_C.$$

Коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{r_0(1 + jq_L)g_0(1 + jq_C)}.$$

Если показатели добротности проводников и изоляции совпадают, то совпадают и углы потерь в них, эти величины можно считать характеристиками линии в целом:

$$q = q_L = q_C; \quad \delta = \delta_L = \delta_C.$$

С применением понятий добротности и угла потерь коэффициент распространения

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{r_0 g_0} (1 + jq) = \omega \sqrt{L_0 C_0} (1/q + j) = \\ &= \omega \sqrt{L_0 C_0} (\delta + j), \end{aligned}$$

при этом $\alpha = \sqrt{r_0 g_0}$; $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}$; $q = \beta / \alpha$;

$$\operatorname{tg} \delta = \alpha / \beta.$$

Обозначив $\frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \omega_0$, получим

$$q = \frac{\omega}{\omega_0 \alpha} \quad [\text{рад} / \text{Нп}].$$

Какой смысл во введении понятия *добротность линии*? Оно представляет собой новый взгляд на проблему оптимизации процесса передачи энергии по электрической линии. Допущение, что добротность проводов и добротность изоляции равны между собой, соответствует оптимальному сочетанию характеристик материала и геометрии проводов с материалом изоляции, при этом затухание получается минимальным, волновое сопротивление – чисто активным, а передача сигналов происходит без частотных искажений. Значение волнового сопротивления

$$z_B = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L}{g_0 + j\omega C}},$$

при $q_L = q_C$ является чисто активным,

$$R_B = \sqrt{\frac{r_0}{g_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

При несоответствии материалов и геометрии добротность линии становится комплексной величиной, в ней появляется мнимая часть, а действительная уменьшается. При выводе комплексного показателя добротности воспользуемся известным из математики фактом, что у малых углов синус и тангенс практически совпадают со значением угла, а косинус – со значением единицы (отличия составляют доли процента). Определим модуль пока-

зателя добротности как среднее геометрическое значение этих величин у проводников и изоляции, а угол потерь энергии в линии – как среднее арифметическое значение углов потерь в проводниках и изоляции:

$$q = \sqrt{q_L q_C}; \quad \delta = \frac{\delta_L + \delta_C}{2}.$$

Векторная диаграмма, приведенная на рисунке 1, показывает, что перекося добротности в сторону одной из составляющих приводит к дополнительным потерям энергии и увеличению затухания (угол дополнительных потерь обозначен буквой ξ).

$$\xi = \frac{\delta_L + \delta_C}{2} - \sqrt{\delta_L \delta_C} = \frac{|\delta_L - \delta_C|}{2}.$$

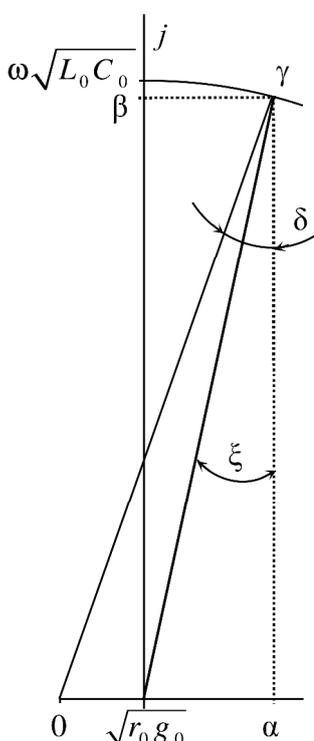


Рисунок 1 – Перекося добротности электрической линии

Этот угол легко рассчитывается через разницу углов потерь энергии в проводниках δ_L и в материале изоляции δ_C . Из рисунка видно, что перекося добротности приводит к незначительному уменьшению коэффициента фазы β и значительному увеличению коэффициента затухания α ; действи-

Получено 06.04.2010

S. L. Kurylin. On complex index of merit for electric lines.

It is offered effectiveness index for electric energy and electric signals transfer deducted from electric lines primary parameters. Calculation of complex electric line index of merit allows to evaluate more objectively line potential, to compare line quality from a new point of view and also to find potential way of improvement for lines themselves and their operation conditions.

тельная часть показателя добротности практически равна модулю, но появляется мнимая часть, что приводит к увеличению потерь. Одновременно перекося добротности приводит к появлению мнимой части у волнового сопротивления и искажениям в передаче сигналов.

При стремлении улучшить качество линии за счёт применения новых материалов или изменения геометрии следует помнить о балансе между добротностью проводников и изоляции, мнимая добротность приносит не пользу, а вред.

С применением комплексного показателя добротности электрических линий $qe^{-j\xi}$ формула постоянной распространения может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{r_0 g_0} (1 + jqe^{-j\xi}) = \sqrt{r_0 g_0} (1 + qe^{j(\pi/2 - \xi)}) = \\ &= \omega \sqrt{L_0 C_0} (1/q + \xi + j). \end{aligned}$$

Применение комплексного показателя добротности электрических линий к воздушным и кабельным линиям электрической связи имеет специфику. По линии связи передаётся спектр частот, поэтому речь должна идти о средних значениях и о зависимости комплексного показателя добротности от частоты.

Как понимать добротность линии? Это количество радиан, на которые изменится фаза сигнала, пока он затухнет на один непер. Чем выше добротность, тем на большее число радиан, а следовательно, и периодов по 2π радиан, т. е. длин волн, переместится сигнал, пока он затухнет на 1 Нп.

Как понимать $\omega_0 = \omega / qa = \omega / \beta$ [км / с]? Этот параметр представляет собой скорость распространения волны, его называют фазовой скоростью.

Расчёт комплексного показателя добротности электрической линии позволяет объективнее оценить потенциальные возможности линии, сравнить качество линий с новой точки зрения, а также найти пути возможного улучшения как самих линий, так и режимов их использования.

Список литературы

1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. школа, 1978. – 528 с.

2 Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 572 с.