

томатически поступает в регулятор уровня 2, где устанавливается необходимый уровень воды, соответствующий заданному уровню в баке-аккумуляторе 1. В баке-аккумуляторе вода не только накапливается, но и постоянно подогревается солнечной энергией.

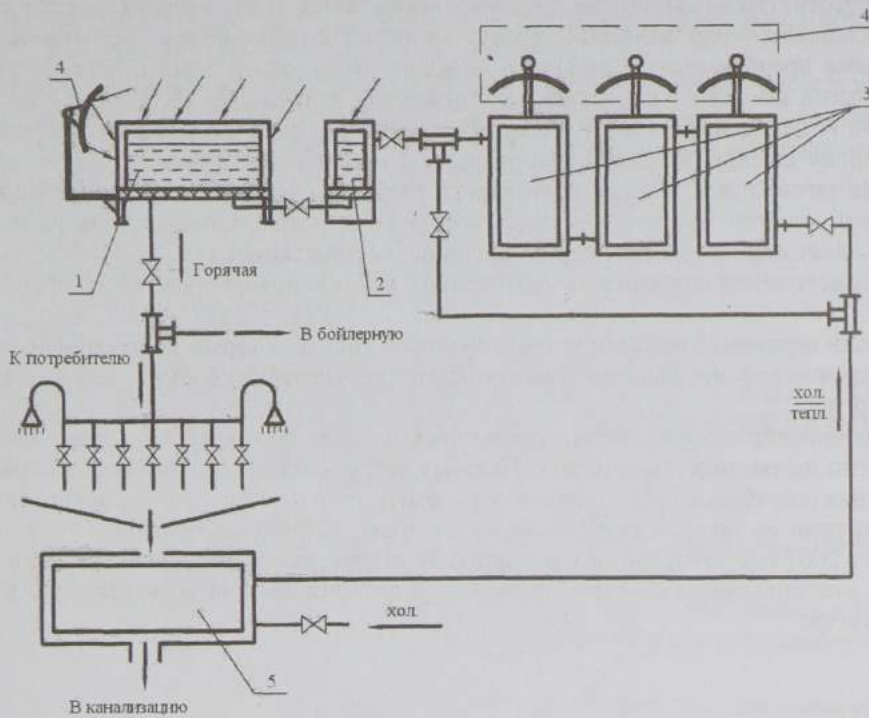


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной гелиоводонагревательной системы:

- 1 – совмещенный бак-аккумулятор; 2 – регулятор уровня воды; 3 – солнечные панели;  
4 – концентраторы солнечной энергии; 5 – теплообменник.

Конструкция бака-аккумулятора, которая защищена патентом Республики Беларусь, предусматривает нагрев воды солнечными лучами с восхода и до захода солнца. В баке солнечная энергия аккумулируется посредством повышения температуры находящейся в нем воды. Конструкция бака-аккумулятора позволяет не только накапливать тепловую энергию, но и сохраняет нагретую воду в темное время суток и при пасмурной погоде. Понижение температуры воды в баке в пасмурную погоду и темное время суток не превышает 5–15 °С за сутки в зависимости от температуры окружающей среды. С целью интенсификации нагрева воды в баке применяется концентратор солнечной энергии 4, который располагается с северной стороны бака. Более эффективно концентратор используется в случае применения механизма слежения за положением солнца на небосклоне. В этом случае концентратор синхронно поворачивается за солнцем в течение суток.

Таким образом, представленная гелиоводонагревательная система наиболее эффективно использует потенциал солнечного излучения на любой географической широте. Солнечная система данной конструкции позволяет получать большие объемы горячей воды, которые необходимы для производственных целей.

УДК 621.3.011.7

## О КОМПЛЕКСНОМ ПОКАЗАТЕЛЕ ДОБРОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

С. Л. КУРИЛИН

Белорусский государственный университет транспорта

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 распределе-

ны 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  $\alpha$  – километрический коэффициент затухания, Нп / км;  $\beta$  – километрический коэффициент фазы, рад/км.

Введём понятие добротности  $q$  и угла потерь  $\delta$  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 добротность катушки на протяжённую линию и выразим через угол потерь  $\delta_L$  энергии в проводниковом материале, а добротность изоляции представим как величину, обратную тангенсу угла диэлектрических потерь  $\delta_C$ :

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

Коэффициент распространения запишется в виде

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

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

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

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  $q = \frac{\omega}{\omega_0 \alpha}$  [рад / 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

$$z_B = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} \text{ при } q_L = q_C \text{ является чисто активным, } R_B = \sqrt{\frac{r_0}{g_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

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 показателя 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  $\xi$ ,

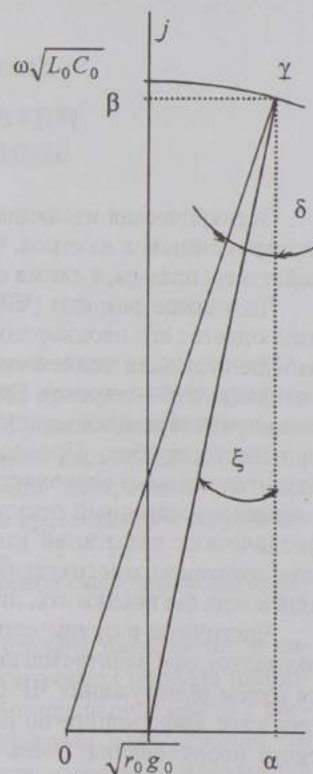


Рисунок 1 – Перекос добротности электрической линии

$$\sigma = \frac{D_L + D_C}{2} - \sqrt{D_L D_C} = \frac{|D_L + D_C|}{2},$$

и легко рассчитывается через разницу углов потерь энергии в проводниках  $\delta_L$  и в материале изоляции  $\delta_C$ . Из рисунка видно, что перекоп добротности приводит к незначительному уменьшению коэффициента фазы  $\beta$  и значительному увеличению коэффициента затухания  $\alpha$ ; действительная часть показателя добротности практически равна модулю, но появляется мнимая часть, что приводит к увеличению потерь. Одновременно перекоп 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  $qe^{-j\epsilon}$  формула постоянной распространения может быть записана в виде

$$\Gamma = \sqrt{r_0 g_0} (1 + jqe^{-j\sigma}) = \sqrt{r_0 g_0} (1 + qe^{j(\pi/2 - \sigma)}) = \sqrt{L_0 C_0} (1/q + \sigma + j).$$

Расчёт комплексного показателя добротности электрической линии позволит 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.

УДК 621.315

## О НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С. Л. КУРИЛИН

Белорусский государственный университет транспорта

И. В. МОЛОЖАВСКИЙ  
КПУП «Гомельводоканал»

Электрическая изоляция при эксплуатации стареет, что, в конце концов, приводит к её пробое и выходу электроустановок из строя. Старение изоляции происходит в результате химических реакций, вызванных воздействием плазмы, а также озона и других активных веществ, образующихся при частичных разрядах.

Частичные разряды (ЧР) происходят в местах наибольшей напряжённости электрического поля, там, где наблюдается его неоднородность. Разрушение изоляции происходит в виде специфических дефектов, которые раньше называли водяными дендритами (гр. *dendron* – дерево), а теперь используют термин «водные триинги» (англ. *tree* – дерево). Дендрит прорастает в изоляционный слой подобно корням дерева, при этом постепенно увеличивается мощность разряда, а эффективная толщина изоляции уменьшается, что, в конце концов, приводит к пробое. Процессы прорастания дендритов длятся годами и десятилетиями, современный уровень развития техники позволяет их контролировать, прогнозируя момент выхода электрооборудования из строя и оценивая остаточный ресурс службы. Этот подход коренным образом отличается от прежней методики периодических испытаний изоляции повышенным напряжением, регламентированной ПТЭ, согласно которой под действием многократных испытательных перенапряжений происходит либо пробой изоляции, которая ещё могла бы послужить, либо возникают дефекты, которые приводят к ускорению процесса старения.

Частичные разряды сопровождаются колебаниями в звуковом и ультразвуковом диапазонах, а также радиочастотным электромагнитным излучением. Неразрушающий контроль электрической изоляции проводится путём обнаружения ЧР с помощью акустических и электромагнитных датчиков и обработки полученной при этом информации по различным методикам, которые являются «ноу-хау» производителей диагностического оборудования; здесь очень важно «отстроиться» от помех, создаваемых другим, работающим рядом электрооборудованием.

Различают два варианта измерения ЧР при контроле изоляции:

1 Комплексное обследование электрооборудования, при котором напряжение постепенно повышают, фиксируя моменты и места появления ЧР. Такую обследованию должна предшествовать проверка изоляции на влажность, т. к. при слишком большой влажности ЧР могут не возникнуть. Для определения мест возникновения ЧР в кабелях используют принцип рефлектометрии. В технически передовых странах предварительной диагностике с контролем ЧР обязательно подвергается все вводимое в строй электрооборудование, а последующие периодические обследования позволяют наблюдать процесс старения изоляции в динамике.