УДК 621.316.13

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВУХПРОВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ МЕЖДУ ЕГО ПРОВОДНИКАМИ

Д. А. Маевский[1], Е. Ю. Маевская[1], А. Н. Семенюг[2], А. А. Савельев[1]
[1]Одесский национальный политехнический университет
[2]Инжиниринговая компания «С-Инжиниринг»

Аннотация. *Исследована зависимость коэффициента полезного действия двухпроводного электрического кабеля с учетом гальванических и магнитных связей между его проводниками в зависимости от комплекса сопротивления нагрузки. Показано, что независимо от комплексного характера волнового сопротивления кабеля максимальное значение коэффициента полезного действия достигается при чисто активной нагрузке и равенстве активных составляющих сопротивления нагрузки и собственного волнового сопротивления кабеля.*

Ключевые слова: *линия с распределенными параметрами, двухпроводный кабель, волновое сопротивление, коэффициент полезного действия.*

Введение

В настоящее время силовые электрические кабели являются наиболее распространенным средством передачи электрической энергии. Применение кабелей имеет неоспоримые технические и экономические преимущества по сравнению с применением воздушных линий передачи:

– отсутствие необходимости отведения зоны отчуждения для высоковольтных линий в условиях плотной застройки на территории населенных пунктов;

– отсутствие необходимости сноса жилых построек в охранной зоне;

– высокая надежность кабельных линий – на них не влияют погодные факторы, намного реже происходят механические повреждения;

– кабельные линии позволяют существенно снизить потери мощности при передаче электроэнергии (согласно [1], на 30% меньше, чем в воздушных линиях).

Согласно [2], общая протяженность кабельных сетей в современных мегаполисах может достигать нескольких сотен километров. При такой длине кабельную линию необходимо рассматривать как линию с распределенными параметрами. Более того, конструктивное исполнение кабеля в виде трех рядом расположенных протяженных проводников вызывает возникновение взаимных связей между этими проводниками. Эти связи имеют индуктивный и гальванический характер и приводят к существенным искажениям действующих токов и напряжений [3]. Исследованию искажений в связанных кабельных линиях посвящено довольно большое количество работ, например, [4, 5, 6]. В этих работах довольно подробно исследуются негативные влияния взаимных связей на форму кривых напряжения и тока, а также на качество передаваемой по кабелю электрической энергии.

Однако из теории линий с распределенными параметрами известно, что электрические процессы в них имеют волновой характер [7]: в каждой точке линии ток и напряжение нужно рассматривать как наложение двух волновых процессов. Первый процесс обусловлен так называемой «падающей» волной, которая распространяется вдоль линии по направлению от источника к нагрузке. Второй процесс – это волна, которая отразилась от нагрузки и распространяется в обратном направлении – от нагрузки к источнику. За счет того, что не вся электрическая энергия падающей волны проникает в нагрузку, а ее часть отражается, возникают потери мощности, и коэффициент полезного действия линии снижается. Эти процессы хорошо исследованы для одиночных, не связанных между собой линий без потерь. В частности, в работе [8] подробно рассмотрены вопросы перетекания от источника к нагрузке активной и реактивной мощности. Показано, что максимальное значение коэффициента полезного действия достигается при равенстве сопротивления нагрузки волновому сопротивлению линии.

Однако зависимость коэффициента полезного действия связанной двухпроводной кабельной линии от сопротивления нагрузки фаз в литературе не исследована. Поэтому получение и интерпретация такой зависимости являются актуальной задачей и определяют цель работы.

© Маевский Д. А., Маевская Е. Ю.,
Семенюг А. Н., Савельев А. А., 2017

1. Вторичные параметры связанной двухпроводной линии

Как известно из курса ТОЭ, классическая линия с распределенными параметрами характеризуется четырьмя первичными погонными параметрами: сопротивлением R_0, индуктивностью L_0, емкостью C_0 и проводимостью G_0. Эти параметры характеризуют собственное сопротивление и индуктивность проводов линии, а также емкость и проводимость изоляции между ними. В этом случае электромагнитные процессы в линии характеризуются двумя вторичными параметрами: коэффициентом распространения

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$$

и волновым сопротивлением

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}\,.$$

Так как в случае равенства сопротивления нагрузки линии ее волновому сопротивлению отсутствуют отраженные волны напряжения и тока (режим согласованной нагрузки) [9], то коэффициент полезного действия линии максимален.

В случае двухпроводной линии все не так просто. Как показано в [4], такой кабель моделируется линией с распределенными параметрами с двумя проводниками и общим проводом. Аналогом общего провода в кабеле является его проводящий экран. Кроме уже перечисленных первичных, двухпроводная линия имеет ряд дополнительных параметров, учитывающих взаимные магнитные и гальванические влияния между проводниками: M_{11}, C_{11}, G_{11}. Здесь принято, что проводники кабеля симметричны, то есть изготовлены из одного и того же материала одинакового сечения. Тогда, введя, согласно [5], обозначения

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0,$$

$$\underline{Z}_1 = j\omega M_{11},$$

$$\underline{Y}_0 = (G_0 + G_{11}) + j\omega(C_0 + C_{11}),\ \underline{Y}_1 = G_{11} + j\omega C_{11},$$

получим два значения коэффициента распространения:

$$\gamma_1 = \sqrt{(\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 - \underline{Y}_1)}\,,$$

$$\gamma_2 = \sqrt{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1)}\,.$$

Эти две постоянные распространения определяют три волновых процесса в проводниках кабеля: собственные падающие и отраженные волны, возникающие в проводнике за счет подключенных к нему источника и нагрузки, а также две пары падающих и отраженных волн, возникающих за счет взаимных влияний на этот проводник двух других проводников кабеля. В соответствии с этим двухпроводный кабель характеризуется двумя волновыми сопротивлениями:

$$\underline{Z}_{B1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 - 2\underline{Y}1}}\,,$$

$$\underline{Z}_{B2} = \underline{Z}_{B3} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}1}}\,.$$

Как и в случае постоянных распространения, мы можем предположить, что волновое сопротивление $\underline{Z}_{B1}$ описывает волновые свойства собственно данного проводника кабеля, а появление $\underline{Z}_{B2}$ вызвано взаимными влияниями соседних проводников. В дальнейшем сопротивление $\underline{Z}_{B1}$ будем называть собственным волновым сопротивлением проводника.

Появление двух дополнительных волновых сопротивлений закономерно ставит вопрос о том, а что такое режим согласованной нагрузки для трехфазного кабеля и при каком нагрузочном сопротивлении коэффициент полезного действия кабеля будет максимальным. Для ответа на этот вопрос выполнены расчеты зависимости коэффициента полезного действия от нагрузочного сопротивления.

2. Зависимость коэффициента полезного действия от сопротивления нагрузки

Для расчета зависимости коэффициента полезного действия от сопротивления нагрузки были использованы выражения, полученные авторами в работах [4] и [5]:

По этим выражениям рассчитывались комплекс тока в начале первого проводника кабеля