

Резонансная однопроводниковая линия электропередачи

АЛИЕВ И.И., СТРЕБКОВ Д.С.

Впервые передачу электроэнергии по однопроводниковой линии на повышенной частоте предложил и осуществил Никола Тесла более 120 лет назад. «В 1893 г. я показал, что нет необходимости использовать два проводника для передачи электрической энергии... Передача энергии через одиночный проводник без возврата была обоснована практически...» [1]. Система Теслы включала источник мощных импульсов, который реализовывался посредством разряда конденсатора через искровой промежуток на первичную обмотку трансформатора Теслы. Высоковольтный выход трансформатора через одиночный провод соединялся со входом приемного трансформатора. Эта идея лежит и в основе принципа работы рассматриваемой системы.

Резонансная однопроводниковая линия электропередачи (РО ЛЭП) включает: источник электрической энергии, преобразователь частоты ПЧ1, резонансный контур (С1, Т1), собственно однопроводниковую ЛЭП (как правило, в виде одножильного высоковольтного кабеля) ОЛ, приемный резонансный контур (С2, Т2), преобразователь частоты ПЧ2, к которому присоединяется одно- или трехфазная нагрузка (рис. 1).

Источник электроэнергии – обычная трехфазная сеть, либо в автономных системах генератор переменного тока повышенной частоты; ПЧ1 служит для преобразования напряжения промышленной частоты в напряжение повышенной частоты в пределах 1–100 кГц.

Напряжение расчетной повышенной частоты подается в резонансный контур, включающий конденсатор С1 и модифицированный трансформатор Теслы Т1. При расчетном соотношении индуктивностей «первичной» и «вторичной» обмоток и ем-

костей, включающих также и межвитковую емкость трансформатора Т1, при соответствующей частоте в последнем возникает резонанс напряжений. Условие возникновения резонанса в системе определяется общеизвестным выражением:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

при этом обязательно выполнение условия равенства произведений индуктивностей и емкостей в передающем и приемном контурах: $L_1C_1 = L_2C_2$.

Ток в высоковольтной обмотке сдвинут по отношению к напряжению на 90°. Один вывод этой обмотки может быть заземлен, либо свободен. К другому выводу присоединяется одножильный кабель ОЛ расчетной длины. Длина ОЛ, включая длины кабеля, высоковольтных обмоток передающего и приемного трансформаторов, должна соответствовать целому числу полуволн $\lambda/2$ либо четверти волны тока. Длина линии l , резонансная частота f_0 , длина волны λ и скорость её распространения c_n связаны простыми соотношениями:

$$l = n\lambda / 2; \quad f_0 = c_n / 2l; \quad \lambda = 2l / n,$$

где n – натуральное число: 1, 2, 3...

Выходное напряжение передающего трансформатора Теслы равно напряжению линии и находится, в зависимости от передаваемой мощности и частоты, в пределах от единиц до 100 кВ и более.

Конец линии ОЛ присоединяется ко входу высоковольтной обмотки приемного трансформатора Теслы Т2, также работающего в резонансном режиме с частотой f_0 . К его «первичной» («низковольтной») обмотке подключают преобразователь частоты ПЧ2, на выходе которого получается требуемое трехфазное напряжение промышленной частоты.

При повышенной частоте однослойная катушка трансформатора Теслы из классической индуктивности превращается в электрический резонатор с распределенными параметрами.

Область частот 1–100 кГц наиболее пригодна для передачи электрической энергии по однопроводниковому волноводу в силу ограничений, которые накладывают потери на излучение из-за антенного эффекта.

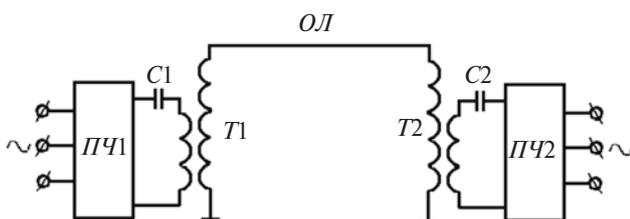


Рис. 1. Схема резонансной однопроводной ЛЭП

При указанных выше соотношениях в линии возникают падающая и отраженная волны и как результирующая — стоячая волна. Стоячие волны напряжения u и реактивного тока i_p резонансной линии длиной l_d показаны на рис. 2.

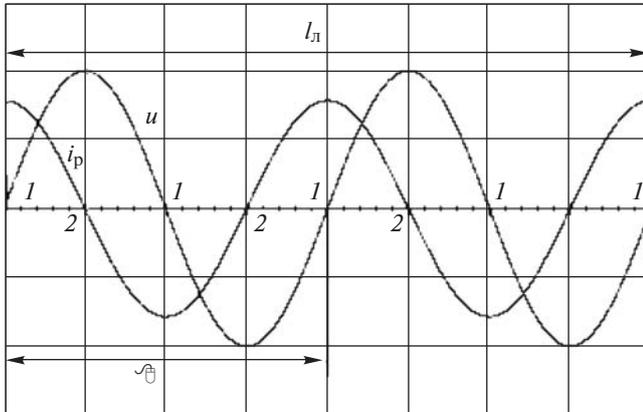


Рис. 2. Стоячие волны напряжения и тока резонансной линии

Для случая, приведенного на рис. 2, длина линии l_d равна двум длинам волны 2λ . Например, при частоте 1 кГц $\lambda=300$ км, следовательно, $l_d = 600$ км.

Пучности реактивного тока i_p линии наблюдаются в точках I , в том числе на зажимах источника электроэнергии и на зажимах электроприемника. В точках I имеются узлы напряжения u , в том числе в начале и в конце линии. Другими словами, потенциалы в начале и в конце линии равны нулю. Поэтому начала высоковольтных обмоток трансформатора могут быть заземлены, что обычно и делается на практике.

Отметим, что рассматриваемая РО ЛЭП несколько отличается от классической системы Теслы: например, отсутствует искровой разрядник; трансформаторы, используемые в рассматриваемой системе, выполнены в виде многослойной высоковольтной катушки, поверх которой наматывается несколько витков толстой первичной обмотки, поэтому традиционное для трансформатора Теслы условие неравенства взаимных индуктивностей первичной и вторичной обмоток здесь не выполняется, т.е. $L_{12} \approx L_{21}$.

Поскольку резонансная однопроводниковая линия разомкнута, в ней нет активного тока, следовательно, электрические потери в линии можно принимать равными нулю. Ток линии является реактивным током перезарядки собственной емкости линии или, по Максвеллу, током смещения.

В качестве нагрузки в одной из опытных РО ЛЭП мощностью до 30 кВт использовались 30 ламп накаливания мощностью по 1 кВт каждая, потребляющие, как известно активную мощность, а также асинхронный двигатель. Таким образом имеет

место полная трансформация реактивной мощности, передаваемой по линии, в активную.

Рассмотрим некоторые экспериментальные характеристики одной из опытных систем для передачи номинальной мощности 20 кВт. Передающий и принимающий воздушные трансформаторы Теслы имеют следующие параметры: число витков каждой высоковольтной обмотки 952; длина 400 м; числа витков низковольтных обмоток, соответственно, 19 и 27; емкости $C1$ и $C2$ — 14 и 12 мкФ. Внутренний диаметр катушек 590 мм. В качестве ПЧ1 и ПЧ2 использовались модернизированные для функций РО ЛЭП преобразователи частоты серии Р-22 мощностью 22 кВт. В качестве нагрузки использовались секции из 24 ламп накаливания мощностью 1 кВт каждая. Входное напряжение составляло 380 В, напряжение линии — до 7 кВ [2]. Диаметр провода выбирался в пределах от 0,08 до 1,3 мм. Выявлено, что параметры вольт-амперной (или внешней) характеристики выходного трансформатора до определенных пределов мощности не зависят от диаметра провода. Резонансная частота РО ЛЭП составляла 3,4 кГц.

На рис. 3 приведено семейство внешних характеристик выходного трансформатора РО ЛЭП для передачи номинальной мощности 20 кВт. Каждая из характеристик получена при соответствующем напряжении ОЛ: 3,2–6,8 кВ. Измерения проведены на постоянном токе на выходе выпрямителя преобразователя частоты Р-22. Сопротивление нагрузки 8 Ом.

Как видно из рис. 3, номинальной мощности при токе 50 А соответствует напряжение РО ЛЭП, равное 6,5 кВ. Внешние характеристики системы вполне соответствуют внешним характеристикам обычного трансформатора.

Расчетные и опытные данные показали, что реактивная зарядная мощность, передаваемая по линии, в первом приближении пропорциональна $U, В$

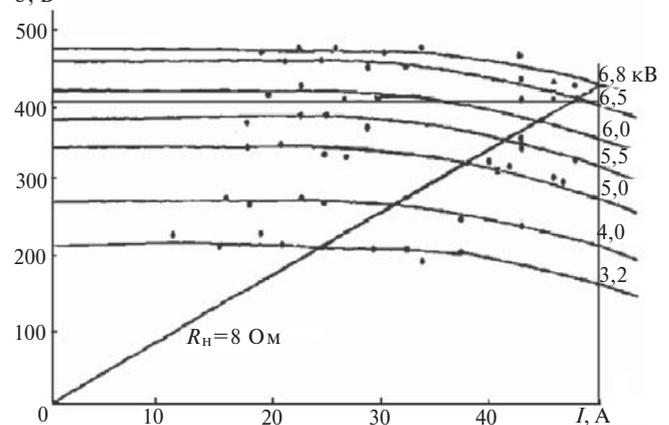


Рис. 3. Внешние характеристики выходного трансформатора РО ЛЭП

тоте и квадрату напряжения линии [2]. Расчетная и экспериментальная (в пределах до номинальной нагрузки 20 кВт) зависимости передаваемой мощности от напряжения линии приведены на рис. 4.

Зависимость передаваемой мощности от напряжения однопроводной линии получена эмпирическим путем и имеет вид

$$P = kU^{1,896},$$

где k – коэффициент пропорциональности, равный 0,541.

Ограничения по мощности в данной конкретной системе были связаны исключительно номинальными параметрами ПЧ.

Например, как видно из рис. 4, при данной резонансной частоте для передачи мощности 50 кВт на напряжении 11 кВ достаточно при тех же трансформаторах Теслы увеличить ресурс ПЧ до соответствующего значения мощности.

В принципе, электроэнергия от передающего трансформатора Теслы к приемному может передаваться по сколь угодно тонкому проводу, а также и без него.

Для подтверждения этого явления обратимся к результатам опыта с использованием двух небольших «классических» трансформаторов Теслы (передающего и приемного), питаемых переменным напряжением частоты 1 МГц, настроенных в резонанс. В верхней части каркасов трансформаторов укреплялись круглые плоские металлические колпаки-излучатели с закругленными краями, к которым присоединялись концы высоковольтных обмоток. Трансформаторы располагались на расстоянии около полуметра друг от друга. Таким образом, получался воздушный конденсатор, обкладками которого являлись упомянутые колпаки и собственно

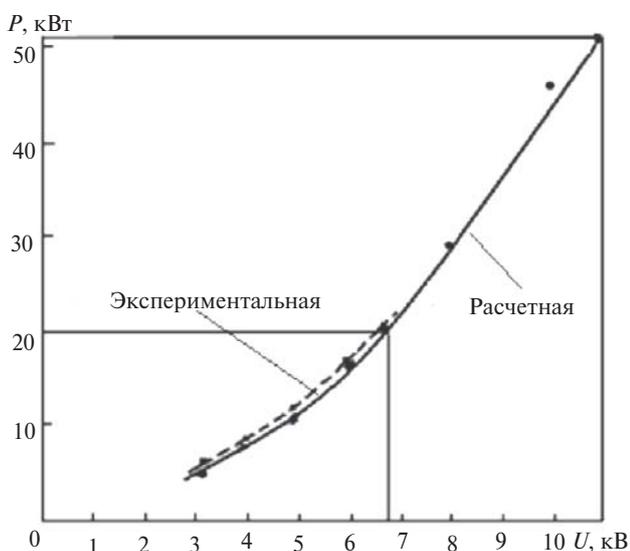


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная характеристики $P = f(U)$

обмотки. Между ними проходил разрядный ток в виде стоячих волн. Мощность на выходе второго трансформатора оказалась практически равной входной мощности первого. Опыт был усложнен: на приемный трансформатор «одевался» алюминиевый решетчатый цилиндр диаметром, вдвое большим катушки, со щелью по образующей. Цилиндр образовывал с высоковольтной обмоткой катушки Теслы второй конденсатор. Таким образом, ток, протекавший между катушкой и цилиндром – реактивный ток или ток смещения. Нагрузка в виде лампы накаливания включалась теперь между цилиндром и «землей».

Этот опыт в известной мере проясняет сущность разрядного реактивного тока (или тока смещения), который генерируется трансформатором Теслы, передается в виде стоячей волны и преодолевает в данном случае два воздушных промежутка: между двумя трансформаторами Теслы и трансформатором и цилиндром.

Объяснение физических процессов в РО ЛЭП и в приведенном опыте представляет известные трудности. Для попытки более или менее ясного толкования процессов, происходящих при передаче электроэнергии по РО ЛЭП, воспользуемся интересными и доказательными, на наш взгляд, представлениями о природе радиоволн, изложенными в [3]. Такое обращение правомерно, поскольку, как уже было показано, передача энергии по однопроводной линии имеет волновой характер.

Прежде всего следует отметить, что указанные явления имеют место только в линии, длина которой, как отмечалось, кратна длине полуволны или четверти волны тока. Именно в такой линии возникает стоячая волна как результирующая от падающей и отраженной волн. Резонанс, необходимый для возбуждения трансформаторов Теслы, обеспечивает с одной стороны максимальную отдачу энергии, с другой, появление в линии преимущественно либо исключительно реактивного тока, который не связан с джоулевыми потерями в обмотках трансформаторов и в линии. Полагаем, что такое возможно только в том случае, когда ток полностью или почти полностью выходит за пределы проводника и не взаимодействует, как это принято считать, с кристаллической решеткой металла провода. На то обстоятельство, что основные электромагнитные процессы при «протекании» тока происходят не в проводе, а в пространстве вокруг него, указывал ещё академик В.Ф. Миткевич в своем классическом труде «Магнитный поток и его преобразования» [4].

Согласно [3] стоячая волна передающей антенны (волновода) представляет собой совокупность непрерывно сменяющих друг друга положительных

и отрицательных зарядов с длиной волны λ . Заряды поляризуют окружающее пространство, вызывая в нем появление объемных, соответственно, отрицательных и положительных зарядов, следующих вдоль волновода от источника к приемнику друг за другом.

Полагаем, что основное отличие РО ЛЭП от передающей антенны или волновода заключается в разнице частот. При радиочастотах происходит излучение энергии, тогда как при частотах в диапазоне 1–100 кГц излучение РО ЛЭП ничтожно мало, а энергия передается вдоль провода к приемнику.

В системе РО ЛЭП, по мнению авторов, совокупность непрерывно сменяющих друг друга положительных и отрицательных зарядов, пространственно напоминающих вихревые тороиды, движется вдоль волновода. В какой-то мере этот процесс иллюстрирует рис. 5. Внутренний диаметр тороида близок к диаметру провода, а внешний определяется, по мнению авторов, значениями частоты, напряжения и плотности зарядов внутри вихря, или, другими словами, значением тока смещения. Ток смещения однопроводной линии можно в первом приближении определить выражением [3]:

$$i_c = 2\pi(C_0 / CT)d\rho / dz,$$

где ρ – объемный заряд, К; C_0 – емкость линии, Ф; C – скорость распространения волны, м/с; T – период волны, с; z – координатная ось линии.

Каждый из движущихся объемных зарядов обладает собственным магнитным полем, как это условно представлено на рис. 5,а, причем полюса этих динамических магнитов в узлах тока – одноименные. На рис. 5,б показаны тороиды 1, 2 и 3, которые опять-таки условно могут дать представление об увеличении объемных зарядов (т.е. увеличении пучности тока) и соответствующих магнитных полях по мере роста реактивного тока и, соответственно, передаваемой мощности.

Поверхности тороидов 1, 2, 3 и т.д. можно представить как совокупность «эквипотенциальных» магнитных силовых линий. Эти магнитные поля, с одной стороны, как бы «упаковывают» ка-

ждый объемный заряд, а с другой, в силу взаимного отталкивания магнитных полюсов и всего пакета от источника энергии обеспечивают движение вдоль провода с осью z со скоростью $c_n = 2lf_0$.

Генерирование такого рода тороидальных вихрей разноименных зарядов с собственными магнитными полями обеспечивает, как отмечал Тесла, *безвозвратную передачу* электроэнергии от источника к приемнику.

Таким образом, в случае РО ЛЭП мы имеем дело с продольными волнами, которые проходят не по сечению провода, а вдоль его поверхности, не входя в него. Из этого, в частности, следует, что для РО ЛЭП не имеют принципиального значения активное сопротивление провода и его сечение, т.е. в качестве проводника для неё можно использовать, например, тонкий стальной провод или трос, заключенные в изолирующую оболочку, либо подвешенные на высоковольтных изоляторах, как это делал Тесла.

В то же время для процессов передачи электроэнергии по этой линии имеют значение её собственная емкость и частота. Другими словами, однопроводная линия при идеальной настройке в номинальном режиме ведет себя как проводник без потерь. Для подтверждения этого при передаче по опытной резонансной линии электроэнергии мощностью 30 кВт использовался наряду с кабелем диаметром жилы 1,3 мм кусок провода диаметром 0,08 мм, который не испытывал существенного нагрева.

Отмеченные особенности объясняют и весьма высокие плотности передаваемой мощности и тока, невозможные в обычных ЛЭП. Так, эффективная плотность тока в линии при передаваемой мощности 20 кВт составила 600 А/мм², а удельная электрическая мощность, передаваемая по линии, 4 МВт/мм² [2]. Изложенные особенности позволяют считать, что РО ЛЭП – это линия, обладающая высокотемпературной квазисверхпроводимостью [5].

Очевидно, при высоких частотах волны будут излучаться в окружающее пространство, как это имеет место в обычной передающей антенне. Однако в указанном выше диапазоне частот эти потери невелики. Опытные и расчетные данные показали, что потери на излучение для линии, передающей 20 кВт, при частоте 3,4 кГц составили всего 102 Вт, т.е. $P_{изл} = 0,005P_H$ [2].

В целом потери в системе РО ЛЭП складываются из электрических потерь в преобразователях ПЧ1 и ПЧ2 и потерь на излучение; КПД современных преобразователей весьма высок. Поэтому интегральный КПД РО ЛЭП в сравнении с обычной

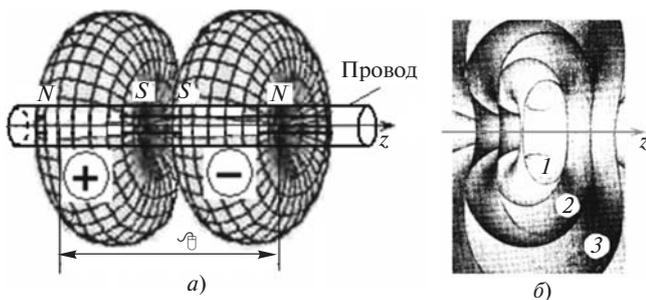


Рис. 5. Модели движения зарядов и магнитных полей вдоль проводника РО ЛЭП

ЛЭП может достигать до 96%. Потери существенно снижаются, если в качестве источника электроэнергии непосредственно используется генератор повышенной частоты (1-50 кГц), приводимый во вращение первичным двигателем — дизелем или турбиной.

Резонансная ЛЭП состоит из простых и надежных узлов. Воздушный трансформатор Теслы во всех отношениях проще и дешевле масляного. Применение генераторов повышенной частоты могло бы исключить использование преобразователей частоты и приблизить КПД РО ЛЭП к еще большим значениям. Но и с применением ПЧ РО ЛЭП обеспечивают колоссальную экономию электроэнергии. Одножильный кабель требует минимального отвода земли, не сопряжен с экологическими проблемами.

Резонансные ЛЭП обеспечивают высокую надежность электроснабжения, поскольку в них в принципе невозможно межфазное короткое замыкание, кабельным РО ЛЭП не страшны стихийные бедствия: снегопад, гололед, ветры и т.д. Капитальные затраты на их сооружение в несколько раз меньше, чем на прокладку обычных высоковольтных ЛЭП, они хороши в качестве распределительных сетей.

Однако наиболее эффективными из-за малых потерь являются дальние и сверхдальние РО ЛЭП. Такой подход может изменить идеологию энергоснабжения народного хозяйства: генерирующие мощности можно будет располагать непосредственно у месторождений, а вместо энергоносителей с

их громоздкими и крайне дорогими системами транспортировки передавать электрическую энергию как наиболее универсальную для использования по простой и надежной РО ЛЭП на любые расстояния с минимальными издержками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tesla N.** World System of wireless Transmission of Energy. Telegraph and Telephone Age, 1927. Oct, 16. Published in a book: Nikola Tesla. Selected works. Articles. Beograd, 1999.
2. **Стребков Д.С., Некрасов А.И.** Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. Изд-3-е. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008.
3. **Харченко К.П.** Лучистая энергия. — М.: РадиоСофт, 2010.
4. **Миткевич В.Ф.** Магнитный поток и его преобразования. Изд-3-е. — М.-Л.: Издательство АН СССР, 1946.
5. **Стребков Д.С.** Высокотемпературная квазисверхпроводимость проводников для емкостных токов. — Доклады РАСХН, 2005. № 4.

[12.04.11]

Авторы: Алиев Исмаил Ибрагимович окончил в 1970 г. электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института. Защитил в 1984 г. в МЭИ кандидатскую диссертацию «Асинхронная каскадная машина для гибкой связи энергосистем» Заместитель заведующего лабораторией ГНУ ВИЭСХ.

Стребков Дмитрий Семенович окончил в 1959 г. факультет электрификации Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства и в 1967 г. мехмат МГУ им. Ломоносова. Защитил в 1983 г. докторскую диссертацию. Директор ГНУ ВИЭСХ.

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru