



**СТРЕБКОВ Дмитрий Семенович** - академик РАСХН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского НИИ электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ)  
Адрес: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2  
e-mail: strebkovds@inbox.ru



**РОЩИН Олег Александрович** - кандидат технических наук, старший научный сотрудник ГНУ ВИЭСХ  
Адрес: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2  
e-mail: viesh@dol.ru



**ЮФЕРЕВ Леонид Юрьевич** - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией ГНУ ВИЭСХ  
Адрес: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2  
e-mail: leouf@ya.ru

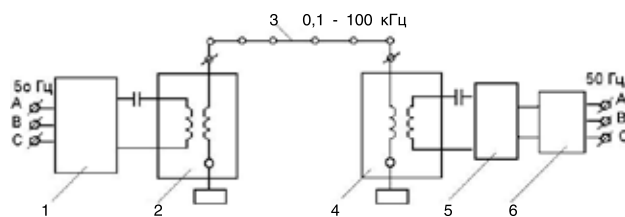
## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Важнейшей задачей электроснабжения потребителей, удаленных от генерирующих станций и электрических систем, является создание экономичных, высокоэффективных, надежных линий электропередач.

Концепция развития электрических сетей до 2020 года предусматривает применение на воздушных линиях напряжением 0,4 кВ самонесущих изолированных проводов (СИП) с одинаковым сечением по магистрали не ниже 70 мм<sup>2</sup> (по алюминию) [1]. Для увеличения потребляемой мощности необходимо демонтировать старые и на их месте спроектировать и смонтировать более мощные электрические сети. Проектирование новых, монтаж и строительство линий электропередач требует инвестиций в размере более 1 млн руб. за 1 км.

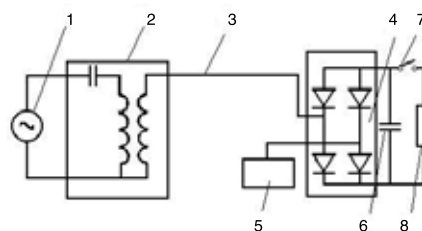
Наряду с существующими, традиционными способами передачи электрической энергии на постоянном и переменном токе предлагается резонансный метод передачи электрической энергии по однопроводниковой кабельной линии на повышенной частоте. В конце XIX века Н. Тесла разработал и предложил передавать электроэнергию по одному проводу в резонансном режиме, однако в его время еще не было электронных преобразующих устройств, таких как: диоды, тиристоры, транзисторы, микросхемы, поэтому этот способ передачи электроэнергии не нашел применения вплоть до наших дней.

С 1992 г. в ГНУ ВИЭСХ ведутся разработки по резонансной системе передачи электрической энергии по однопроводниковой кабельной или воздушной линиям на повышенной частоте. Разработанные схемы представлены на рис. 1-4 [2, 3].



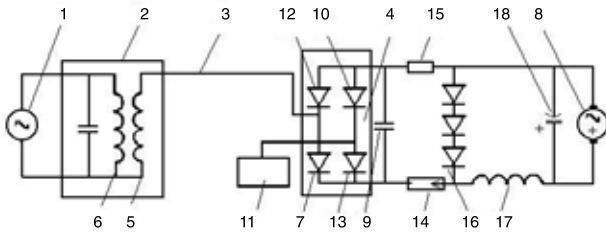
**Рис. 1.** Электрическая схема РС с двумя высокочастотными (ВЧ) трансформаторами:

- 1 - генератор повышенной частоты;
- 2 - резонансный контур повышающего трансформатора;
- 3 - однопроводниковая линия;
- 4 - резонансный контур понижающего трансформатора;
- 5 - выпрямитель;
- 6 - инвертор



**Рис. 2.** Схема передачи электрической энергии с диодно-конденсаторным блоком:

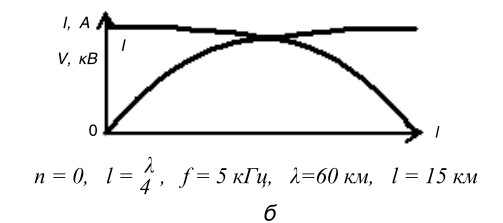
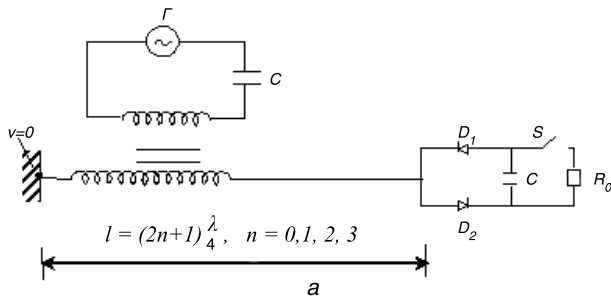
- 1 - генератор повышенной частоты;
- 2 - резонансный контур повышающего трансформатора;
- 3 - однопроводниковая линия;
- 4 - преобразовательный мост;
- 5 - естественная емкость;
- 6 - конденсатор выпрямителя;
- 7 - ключ;
- 8 - нагрузка



**Рис. 3.** Схема передачи электрической энергии с использованием импульсного преобразователя постоянного тока:

- 1 - генератор повышенной частоты;
- 2 - резонансный контур повышающего трансформатора;
- 3 - однопроводниковая линия;
- 4 - преобразовательный мост;
- 5, 6 - резонансный трансформатор;
- 7, 10, 12, 13 - высокочастотные диоды;
- 8 - нагрузка;
- 9 - конденсатор выпрямителя;
- 11 - естественная емкость;
- 14 - разрядник;
- 15 - дополнительное сопротивление;
- 16 - разрядный диод;
- 17 - дроссель;
- 18 - конденсатор

Конкуренция между системами передачи электрической энергии на постоянном и переменном токе продолжается до настоящего времени, однако все это происходит в рамках классических двух-трехпроводных замкнутых линий электропередач. Мы показали экспериментально, что однопроводниковая линия с высокочастотным резонансным трансформатором Тесла в начале линии может передавать электрическую энергию на любой, в том числе и на нулевой частоте, т.е. на выпрямленном токе. Однопроводниковые резонансные системы



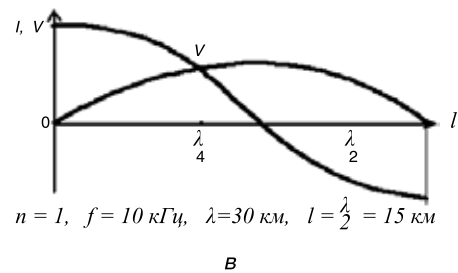
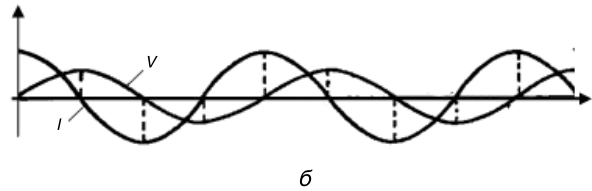
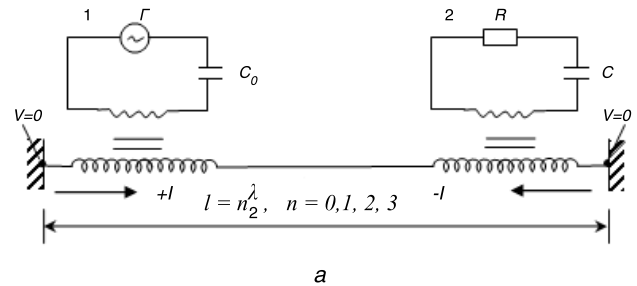
**Рис. 4.** Электрическая схема (а) и распределение токов и напряжений (б) в четвертьволновой однопроводниковой резонансной линии, разомкнутой со стороны нагрузки (или с нагрузкой в виде емкости):

- Г - генератор;
- $C_0$  - емкость резонансного контура;
- $D_1$  и  $D_2$  - диодный блок;
- $C$  - емкость нагрузки;
- S - электронный ключ;
- $R_0$  - сопротивление нагрузки

открывают возможности для создания сверхдальних кабельных линий электропередач и, в перспективе, замены существующих воздушных линий на кабельные однопроводниковые линии. Тем самым будет решена одна из важнейших проблем электрификации - повышение надежности электроснабжения.

На рис. 4 показана электрическая схема и распределение токов и напряжений в однопроводниковой резонансной линии, разомкнутой со стороны нагрузки или с нагрузкой в виде емкости.

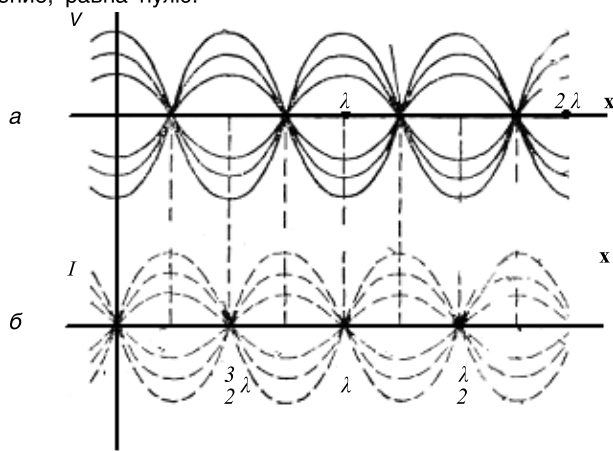
Разомкнутая линия длиной  $l = (2n+1) \cdot \lambda/4$ ,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  имеет у зажимов генератора пучность тока и узел напряжения, а при длине  $l = n \cdot \lambda/2$  пучность напряжения и узел тока. В обоих случаях линия эквивалентна резонансному колебательному контуру.



**Рис. 5.** Распределение токов и напряжений в однопроводниковой линии, замкнутой с двух сторон на землю:  
 а - электрическая схема (Г - высокочастотный генератор;  $R_n$  - сопротивление нагрузки;  $C_0$  - емкость резонансного контура);  
 б - распределение стоячих волн тока и напряжения вдоль однопроводниковой линии;  
 в - распределение токов и напряжений в полуволновой однопроводниковой линии

На рис. 5 представлено распределение волн тока и напряжения в однопроводниковой линии, замкнутой на землю с обоих концов. Классический инженер-электрик, посмотрев на электрическую схему на рис. 1, 4 и 5, скажет, что это замкнутая двухпроводная линия электропередачи с использованием земли в качестве второго провода и активного тока проводимости в замкнутой цепи. Правильное объяснение даст радиоинженер: это обычная волноводная линия со сдвигом фаз между током и напряжением  $90^\circ$ , установленная на заземленных металлических опорах, присоединенных к линии в точках с узлами напряжения. Заземление линии в точках с узлами напряжения не изменяет параметры волноводной линии и не сказывается на величине передаваемой мощности.

Стоячие волны в разомкнутой однопроводниковой линии (рис. 6) получаются в результате сложения падающей и отраженной волн, имеющих одинаковую амплитуду. Фаза напряжения и тока во всех сечениях линии одинакова, а между током и напряжением существует сдвиг по фазе на  $90^\circ$  во времени и в пространстве. Поэтому, когда во всей линии напряжение максимально, ток равен нулю и наоборот. Пространственный сдвиг выражается в том, что в сечениях линии с пучностями напряжения наблюдаются узлы тока, а при узлах напряжения наблюдаются пучности тока. Фаза во всех сечениях линии одинакова. Это значит, что во всей линии напряжение равно нулю или достигает максимума в один и тот же момент времени, но эти максимумы для разных сечений различны, поскольку амплитуда колебаний вдоль линии изменяется. То же самое происходит с волнами тока. Средняя мощность, отдаваемая генератором в разомкнутую однопроводниковую линию без потери или в линию, замкнутую на реактивное сопротивление, равна нулю.



**Рис. 6.** Стоячие волны. Распределение волн:  
 а - напряжения;  
 б - тока в однопроводниковой линии в различные моменты времени

Если линия работает в режиме стоячих волн, то ее входное сопротивление имеет реактивный характер. Если в линии имеются потери, то некоторая бегущая волна от генератора компенсирует эти потери. При наличии бегущих и стоячих волн в линии ее входное сопротивление содержит активную и реактивную составляющие.

Стационарные или стоячие волны на рис. 6 являются для инженера-электрика явлением, не имеющим реального физического содержания, поскольку длина линий электропередач обычно не превышает 1000 км, а длина волны тока и напряжения при 50 Гц составляет 6000 км. Полуволновая линия (рис. 5) длиной 1000 км может быть получена при частоте 150 Гц, и даже в двух-трех проводном классическом исполнении такая линия будет передавать значительно большую мощность, чем при частоте 50 Гц. Однако классические линии электропередач проявляют резонансные свойства только в аварийном режиме (например, при обрыве линии у потребителя). Преимущества резонансной однопроводниковой системы передачи электрической энергии:

- возможность создания сверхдальних кабельных линий электропередач;
- возможность передавать электроэнергию на такие объекты, на которые нецелесообразно по техническим и экономическим причинам передавать существующими способами на постоянном или переменном токе;
- объекты, куда необходимо скрытно подать электроэнергию: тундра, где опоры ЛЭП либо тонут, либо всплываю;

вают; прииски в тайге, старательные артели, хутора, куда воздушные линии прокладывать нерентабельно; болотистые места, горы, где освоение полезных ископаемых затруднено в связи с отсутствием электричества, и т.д.;

- классические линии электропередач проявляют резонансные свойства в аварийном режиме (например, при обрыве линии у потребителя), что приводит к перенапряжению и разрушению изоляторов, а при обрыве резонансной однопроводниковой линии резко меняется частота и линия отключается;

- в связи с малой собственной емкостью линии передача электрической энергии осуществляется по однопроводниковому высоковольтному кабелю без использования линейных реакторов;

- экономия электроэнергии при передаче;
- резонансная система позволяет представлять потребителю высококачественную электроэнергию и разделять частоты генератора и потребителя, благодаря вставке постоянного тока на входе и в конце линии;

- автоматика резонансной системы выполняет функции защиты от перенапряжения, короткого замыкания, провалов или скачков тока и напряжения при резких изменениях нагрузки;

- существенное снижение массогабаритных размеров электрооборудования благодаря использованию повышенной частоты;

- экономия проводниковых материалов, снижение стоимости монтажа;

- уменьшение расходов на техническое обслуживание, отсутствие коротких замыканий в однопроводниковой линии, безопасность при обрыве линии;

- более высокая надежность в условиях террористических актов и стихийных бедствий (гололед, снегопад, наводнение, сильный ветер, удары молнии);

- кабельная резонансная линия пожаробезопасна, ей не нужна автоматика защиты от замыкания и перенапряжения между жилами;

- при прокладке кабельной линии в земле не нужно отводить земли под ЛЭП и изменять ландшафт местности;
- экологическая безопасность, не нарушает природу и среду обитания;

- резонансная система передачи электроэнергии - это конечный продукт, за который потребитель сразу начнет платить по счетчику;

- резонансная система идеально подходит для питания светодиодов или ламп на светодиодах;

- возможность передачи электроэнергии по однопроводниковой линии на воздушные шары, в колодцы для питания погружных насосов;

- возможность электропитания по тонкому однопроводниковому кабелю электробуров бурильных установок;

- возможность передачи электроэнергии по однопроводниковой линии на электропланер для осуществления его взлета;

- возможность использования продукции на экспорт.

### Выводы

1. Разработан резонансный метод передачи электрической энергии на частоте 1...100 кГц с использованием преобразователя частоты, резонансного контура, повышающего высокочастотного трансформатора и волноводной однопроводниковой линии напряжением 1-110 кВ.

2. Разработаны электрические схемы двух типов резонансных систем: с двумя высокочастотными трансформаторами и с высокочастотным трансформатором на входе резонансных систем и диодно-конденсаторным блоком на конце линии у потребителя. Преимущества первого типа резонансной системы заключаются в возможности использования высокого напряжения в линии и низкого напряжения на нагрузке. Преимущества второго типа резонансной системы заключаются в простоте настройки и эксплуатации в связи с отсутствием ре-

зонансного контура на выходе резонансной системы, однако для второго типа резонансной системы требуется высоковольтный инвертор.

3. С использованием разработанной методики расчета резонансной системы электроснабжения определены параметры передающего и приемного резонансных контуров  $L, C, R, f$  с высокочастотными трансформаторами и однопроводниковой линии. Разработан метод настройки двухконтурной резонансной системы электроснабжения с учетом взаимной индукции обмоток высокочастотных трансформаторов. Измерения параметров изготовленных контуров подтвердили соответствие с расчетными данными. Показано, что расчетные потери на излучение при частоте 1 кГц не превышают 8,6% передаваемой мощности при длине линии до 9000 км.

4. Разработаны и изготовлены резонансные высокочастотные трансформаторы электрической мощностью 25 кВт, напряжением 10 кВ, с резонансной частотой 1...25 кГц, которые характеризуются почти в 2 раза меньшими затратами материалов по сравнению с трехфазными трансформаторами 50 Гц той же мощности.

5. Результаты исследований показали, что разработанные комплекты оборудования позволяют передавать электрическую мощность 20,5 кВт при напряжении на линии 10 кВ и частоте 3,4 кГц. Экспериментально подтверждено свойство однопроводниковой линии передавать электрическую энергию без существенных джоулевых потерь на сопротивлении линии. Предельная электрическая плотность тока и предельная удельная электрическая мощность на 1 мм<sup>2</sup> площади сечения проводника

линии резонансной системы превышают параметры линий переменного и постоянного тока.

6. Экспериментально установлено, что свободные концы высоковольтных обмоток трансформаторов имеют нулевой потенциал по отношению к земле и их соединение с землей не изменяет резонансные характеристики линии и ее электрические параметры. Однопроводниковая резонансная система ведет себя как волновод, в котором заземление участков с узлами волны напряжения не влияет на распределение потенциалов и токов и параметров нагрузки. Добротность резонансной системы при частоте 5 кГц в десятки раз выше, чем при частоте 50 Гц, что в условиях резонанса приводит к значительному увеличению напряжения и передаваемой мощности вдоль проводящего канала.

7. Рассмотрены основные области применения резонансной системы:

- электроснабжение сельскохозяйственных потребителей с помощью воздушных и кабельных однопроводниковых линий, передача электрической энергии на мобильные объекты;

- экспериментально подтверждена возможность передачи электрической энергии от солнечной батареи мощностью 100 Вт в резонансном режиме по однопроводной линии.

8. Расчеты экономической эффективности показывают быструю окупаемость инвестиций и выгодность для всех потенциальных участников, как для создателей данной технологии, для инвесторов и кредиторов, так и для сетевых компаний.

## Литература:

1. Энергетическая стратегия сельского хозяйства России на период до 2020 года. - М.: ВИЭСХ, 2009. - 36 с.

2. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи электрической энергии. Изд. 3-е. - М.: ВИЭСХ, 2008. - 350 с.

3. Юферев Л.Ю., Стребков Д.С., Роцин О.А. Экспериментальные модели резонансных систем электрической энергии. - М.: ВИЭСХ, 2010. - 208 с.

## НАША ИНФОРМАЦИЯ

### II научно-практическая конференция «Энергоэффективность 2011. Первый опыт. Инновации. Перспективы саморегулирования»

С принятием Федерального закона РФ от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» появилась правовая основа реализации энергосбережения в экономике. По прошествии почти двух лет с момента принятия законопроекта настала объективная необходимость его практического применения, и для этого нужно перенять инновационный мировой опыт.

В связи с этим 20 июля 2011 года в здании Правительства Москвы состоится II научно-практическая конференция «Энергоэффективность 2011. Первый опыт. Инновации. Перспективы саморегулирования». Инициаторами проведения мероприятия выступает НП «СРО «АЛЬЯНС СТРОИТЕЛЕЙ». Мероприятие пройдет при поддержке Общероссийской общественной организации «Деловая Россия», Министерства регионального развития РФ, Национального объединения саморегулируемых организаций в области энергетического обследования, Национального объединения строителей.

К участию в конференции приглашены: представители Министерства энергетики России, Министерства регионального развития РФ, Государственной Думы РФ, ФГБУ «Российское энергетическое агентство», Национального объединения саморегулируемых организаций в области энергетического обследования, Национальных объединений строителей, проектировщиков, изыскателей, ведущих СРО в области энергетического обследования, специалисты в области энергетического обследования, представители строительных и проектных компаний и другие участники профессионального сообщества.

**В ходе работы конференции будут рассмотрены следующие вопросы:**

- первые итоги реализации государственных программ по энергосбережению и повышению энергетической эффективности;

- использование нестандартных и возобновляемых источников энергии в строительном комплексе и ЖКХ;

- государственные и негосударственные источники финансирования программ по энергосбережению и повышению энергетической эффективности (в том числе в строительстве и ЖКХ);

- энергоэффективное строительство. Опыт практического применения инновационных: технологий, оборудования, материалов;

- первые итоги введения саморегулирования в отрасли;

- проблемы внедрения мероприятий по энергосбережению;

- системы учета топливно-энергетических ресурсов;

- дефицит кадров;

- использование энергоаудита как действенного инструмента для достижения энергетической эффективности.

**Дата проведения:** 20 июля 2011 года.

**Место проведения:** г. Москва, ул. Новый Арбат, дом 36/9, здание Правительства Москвы.

**Время проведения:** регистрация с 8.30. Конференция с 10.00 до 17.30.

**Организатор:** ООО «OmniConsultingGroup».

**Оргкомитет:** тел./факс: (495) 223-89-74.

**Сайт:** <http://www.omnicconf.ru/>.

**E-mail:** [conf@ocg.ru](mailto:conf@ocg.ru)