

Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии на объекты инфраструктуры ОАО «РЖД»

Д. В. ЕРМОЛЕНКО¹, Л. Ю. ЮФЕРЕВ², О. А. РОЩИН²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), Москва, 109428, Россия

Аннотация. Представлены результаты испытаний экспериментального образца резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии на повышенной частоте на расстояние 2000 м. В эксперименте использовалась линия электропередачи на основе коаксиального кабеля. Проведены замеры электромагнитных полей от незаэкранированной линии электропередачи. Рассмотрены преимущества резонансной системы, работающей на частоте 7 кГц, по сравнению с однофазной системой.

Ключевые слова: однопроводная резонансная система; передача электроэнергии; преобразователь частоты; резонансный контур

Введение. Вопросы электроснабжения удаленных потребителей должны решаться на основе электрических систем нового поколения с использованием повышенной частоты, позволяющей создавать электрооборудование со значительно меньшими массогабаритными размерами, чем существующее оборудование, работающее на частоте 50 Гц. При использовании протяженных сетей особенно важно поставлять потребителю качественную электроэнергию, снижать затраты на строительство линий электропередачи и потери в сетях [1, 2, 3].

В ФГБНУ ВИЭСХ (с 2016 г. ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) с 1992 г. ведутся разработки резонансной системы передачи электрической энергии по однопроводной кабельной или воздушной линии на повышенной частоте [2, 3].

Совместная работа ученых ВИЭСХ с железнодорожниками имеет давние традиции. Ученые института участвовали в решении таких проблем, как «Разработка методики определения несимметрии токов и напряжений и оценка ее влияния на устройства первичного электроснабжения и районных потребителей» (1956–1959), «Теоретическое обоснование выбора наиболее целесообразных схем первичного и тягового электроснабжения» (1957–1958), «Исследо-

вания кривой тока и напряжения и их воздействия на систему первичного электроснабжения на электровазах с ионными преобразователями, разработка мероприятий по снижению гармоник и их вредного воздействия на работу электроснабжения и нетяговых потребителей» (1957–1959) [4].

В 2012 г. ФГБНУ ВИЭСХ совместно с ОАО «ВНИИЖТ» при участии представителей Департамента технической политики ОАО «РЖД», Главного управления электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» и ООО «Промавтоматика», провел исследования и испытания резонансной однопроводной системы передачи электрической энергии мощностью 3 кВт. Схема однопроводной системы передачи электроэнергии представлена на рис. 1.

Принцип работы резонансной однопроводной системы электропередачи основан на использовании двух резонансных трансформаторов с частотой

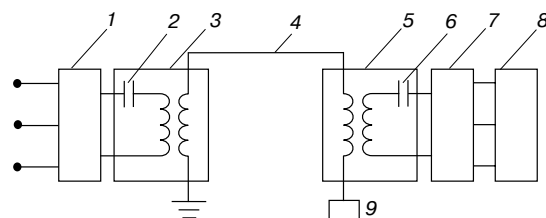


Рис. 1. Резонансная однопроводная система передачи электроэнергии:

1 — преобразователь частоты; 2 — емкость резонансного контура повышающего трансформатора; 3 — резонансный контур повышающего трансформатора; 4 — однопроводная линия; 5 — резонансный контур понижающего трансформатора; 6 — емкость резонансного контура понижающего трансформатора; 7 — выпрямитель-инвертор; 8 — нагрузка; 9 — изолированная емкость

Fig. 1. Resonant single-wire power transmission system:
1 — frequency converter; 2 — capacity of the resonant circuit of step-up transformer; 3 — resonant circuit of step-up transformer; 4 — single-wire line; 5 — resonant circuit of step-down transformer; 6 — capacity of the resonant circuit of step-down transformer; 7 — rectifier-inverter; 8 — load; 9 — insulated container

■ E-mail: Ermolenko.Dmitry@vniizht.ru (Д. В. Ермоленко)



Рис. 2. Комплект оборудования для передачи электроэнергии в резонансном режиме

Fig. 2. Set of equipment for the transmission of electricity in a resonant mode



Рис. 3. Размещение оборудования для передачи электрической энергии

Fig. 3. Equipment placing for the transmission of electrical energy



Рис. 4. Размещение оборудования для приема и обратного преобразования электрической энергии

Fig. 4. Equipment placing for the reception and reverse conversion of electrical energy

той 5–15 кГц и однопроводной линии между ними (рис. 1) с напряжением линии 1–10 кВ при работе в резонансном режиме.

Резонансные трансформаторы состоят из силового резонансного контура и повышающей/понижающей обмотки.

Резонансные системы обеспечивают высокую эффективность передачи энергии при настройке всей системы на определенные параметры напряжения, частоты и нагрузки. Однако современный энергопотребитель имеет меняющуюся во времени нагрузку, при этом выходное напряжение на приемной стороне также меняется в несколько раз, что недопустимо при эксплуатации электрооборудования.

Для решения этой проблемы была разработана принципиально новая резонансная система передачи электроэнергии с использованием резонансных трансформаторов [5] (рис. 2), которая состоит из (слева направо): измерительного устройства, передающего преобразователя напряжения (ПН), приемного (обратного) преобразователя напряжения (ОП), блока дополнительной нагрузки (ограничитель напряжения) и инвертора со стандартным выходным напряжением 220 В, 50 Гц.

Комплект оборудования работает на частоте 7–9 кГц и при напряжении в линии электропередачи 980 В позволяет передавать электроэнергию по однопроводной линии электропередачи мощностью до 3000 Вт на расстояние до 2000 м.

Блок дополнительной нагрузки (рис. 2) предназначен для компенсации резонансных явлений в длинных линиях электропередачи во время работы приемного оборудования без нагрузки. При появлении нагрузки этот блок автоматически отключается.

Испытания комплекта оборудования (см. рис. 3 и 4) проводились сотрудниками ОАО «ВНИИЖТ», ОАО «НИИАС» и ФГБНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии на опытном участке на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ в соответствии с Программой и методикой испытаний системы передачи электрической энергии по однопроводной линии в резонансном режиме, согласованной с ОАО «НИИАС», ФГБНУ ВИЭСХ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), причастными департаментами ОАО «РЖД» и утвержденной ОАО «ВНИИЖТ» 29.06.2012 г.

Цель испытаний: измерение основных технических характеристик резонансной системы передачи электроэнергии на холостом ходу и при максимальной нагрузке с использованием воздушной линии электропередачи и заземлением ОП. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при передаче мощности 2590 Вт по однопроводной линии общий КПД составил 83 %.

Таблица 1

Результаты испытаний по передаче электроэнергии с максимальной нагрузкой

Table 1

Test results for power transmission with maximum load

Вариант нагрузки	Напряжение ПН (вых.)/ОП (вх.), В	Мощность, потребляемая ПН из сети, Вт	Напряжении на выходе ОП, В	Ток на выходе ОП, А	Частота, кГц	Напряжение на выходе инвертора, В	Выходная мощность, Вт
XX с ограничителем	950	488	—	—	6,88	—	—
6 ТЕНов по 500 Вт + 2 лампы по 100 Вт	950/890	3100	185	14	7,2	219	2590

Таблица 2

Результаты испытаний по передаче электрической энергии с различными вариантами заземления

Table 2

The test results for the transmission of electrical energy with different grounding options

Вариант заземления	Напряжение выходное передающего блока, В	Мощность, потребляемая ПН из сети, Вт	Напряжения входное приемного блока, В	Напряжение на выходе ОП, В	Ток на выходе ОП, А	Частота, кГц	Выходная мощность, Вт
Стандартное заземление 4 Ом	950	3100	890	185	14	7,2	2590
Проволока закопанная длиной 2–4 м	940	2990	830	176	11,4	7,14	2007
Проволока закопанная длиной 0,2 м	960	1800	750	174	5,6	7,0	974
Без заземления	920	290	50	15	0,62	7,0	9,4

В ходе другого эксперимента определялось влияние качества заземления приемного преобразователя на максимальную передаваемую мощность. Результаты эксперимента с четырьмя вариантами заземления представлены в табл. 2. Из результатов этого эксперимента видно, что даже при минимальном заземлении приемного преобразователя разница в передаваемой мощности небольшая и при заземлении в виде отрезка проволоки длиной 0,2 м можно передать электроэнергию мощностью около 1 кВт.

Техническое заключение о целесообразности использования резонансных методов передачи электроэнергии на железнодорожном транспорте. Подтверждена возможность применения резонансной однопроводной системы передачи электрической энергии на частоте около 7 кГц для передачи электрической энергии мощностью до 3 кВт от стационарной системы электроснабжения (трехфазное напряжение 380 В переменного тока частотой 50 Гц с заземленной нейтралью) к однофазной нагрузке и ОП с индивидуальным заземлением:

- нестабилизированным выпрямленным постоянным напряжением в диапазоне 170–339 В (может

быть использовано для обогревательных приборов и освещения);

- стабилизированным однофазным напряжением ~ 220 В переменного тока частотой 50 Гц (может быть использовано для типовых однофазных потребителей электроэнергии ~ 220 В) при комплектации системы инвертором постоянного напряжения в стабилизированное однофазное напряжение переменного тока частотой 50 Гц (в испытаниях инвертор организован на базе источника бесперебойного питания серийного производства Power-Vision Black). В дальнейшем может быть разработан специальный инвертор, позволяющий получать как однофазное напряжение ~ 220 В, так и трехфазное напряжение ~ 380 В.

Как и во всех статических преобразователях электрической энергии КПД резонансной однопроводной системы передачи электрической энергии растет с увеличением мощности нагрузки. КПД непосредственно преобразовательного оборудования при максимальной его нагрузке может достигать 88–91 %.

Резонансную однопроводную систему передачи электрической энергии после выполнения соответ-

ствующих проектно-конструкторских работ можно будет использовать в качестве резервной для питания удаленных линейных объектов связи, сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), а также путевого инструмента. Возможно использование резонансной однопроводной системы для передачи электрической энергии объектам, электроснабжение которых традиционными системами электроснабжения на постоянном и переменном токе по техническим и экономическим причинам нецелесообразно.

Достоинства резонансной однопроводной системы передачи электрической энергии на повышенной частоте. В ходе испытаний выявлены следующие достоинства резонансной однопроводной системы передачи электрической энергии на повышенной частоте:

- повышенная безопасность по сравнению с передачей электрической энергии при одном и том же уровне действующего значения напряжения в проводе относительно земли на постоянном и переменном токе частотой 50 Гц. При действующем значении напряжения провода до 1 кВ поражение электрическим током человека при частоте 7 кГц не происходит;

- малые массогабаритные размеры ПН и ОП по сравнению с возможной подобной системой на частоте 50 Гц;

- для передачи электрической энергии используется один провод. При передаче мощности до 3 кВт ОП достаточно либо заземлить через сопротивление 100–150 Ом (для традиционных систем электроснабжения частотой 50 Гц сопротивление заземляющего устройства, используемого для заземления оборудования, обычно должно быть не более 4 Ом), либо соединить с землей через емкость 0,12 мкФ; при малых нагрузках в некоторых случаях с учетом местных условий приемные блоки могут работать без заземления;

- в настроенной системе передачи электрической энергии по однопроводной линии в резонансном режиме сечение линейного провода выбирается как для однопроводной системы электроснабжения постоянного тока; в качестве линии электропередачи может применяться как одножильный провод, так и экранированный кабель типа РК-75;

- влияние на каналы проводной связи в полосе частот 300–3400 Гц и системы СЦБ (АЛС, автоблокировка) отсутствует из-за несовпадения рабочих диапазонов частот резонансной линии и перечисленных систем; влияние на каналы проводной связи цифровых систем передачи xDSL по кабелям с медными жилами и на канал поездной радиосвязи в диапазоне волн на частоте 2,13 МГц и в диапазоне 150 МГц не превышает установленных норм;

- к резонансной системе электропередачи может быть подключено более одного ОП с потребителем электроэнергии;

- оборудование резонансной системы передачи электрической энергии не боится коротких замыканий в нагрузке, так как система при этом выходит из резонанса и преобразователь напряжения работает на холостом ходу;

- для подключения потребителей электрической энергии предусмотрена гальваническая развязка.

Недостатки резонансной однопроводной системы передачи электрической энергии на повышенной частоте. Недостатками данной системы являются:

- ручная настройка системы под конкретную линию;
- резонансная линия в режиме стоячих волн, когда достигается наибольший эффект при передаче электрической энергии, не представлена (для 7 кГц длина волны равна 43 км, резонанс проявляется при длине около 10 км);

- не предусмотрено отключение системы в случае обрыва провода;

- не отработаны способы заземления в случае использования для электропитания путевого инструмента, также должен быть исключен вариант с использованием в качестве заземления рельсов из-за возможных нарушений цепей СЦБ (коротких замыканий в изолирующих стыках);

- КПД системы сильно зависит от нагрузки: при отключенной нагрузке потребляется электрическая энергия.

С учетом полученных результатов испытаний целесообразна организация пилотного проекта с применением резонансной однопроводной системы передачи электрической энергии на объекты ОАО «РЖД» с разработкой технического задания, конструкторской документации, изготовлением опытного образца системы.

Результаты лабораторных испытаний. В ходе выполнения работ в рамках собственной инициативы ФГБНУ ВИЭСХ было проведено сравнение резонансной системы передачи электроэнергии мощностью 3000 Вт с напряжением в линии электропередачи 980 В, работающей на частоте 7 кГц, с системой передачи электроэнергии на повышенной частоте с аналогичными характеристиками. Целью эксперимента было сравнение передаваемой мощности на расстояние 1000 м по экранированному коаксиальному кабелю типа РК-75.

Так как электрическая емкость кабеля длиной 2000 м составила 60 нФ, то энергия, затрачиваемая на «раскачивание» этой емкости, составит около 2530 ВА. Это величина была получена по формуле

$$Q = U_{\text{л}}^2 2\pi f C,$$

где $U_{\text{л}}$ — напряжение в линии электропередачи, В; f — резонансная частота, Гц; C — емкость линии электропередачи.

Таблица 3

Результаты измерения напряженности электрического и магнитного поля от оборудования резонансной системы передачи электроэнергии

Table 3

Results of measuring electric and magnetic field intensities from the equipment of resonant system of electricity transmission

№ точки измерения	Напряженность электрического поля, В/м	Плотность магнитного потока, мкТл
1	150	1,7
2	120	0,9
3	100	0,6

В резонансной системе емкость линии электропередачи входит в состав резонансного контура, применение этого кабеля в качестве линии электропередачи только немного уменьшило резонансную частоту, и передаваемая мощность составила 2500 Вт. Однако для нерезонансной системы передачи электроэнергии на повышенной частоте эта емкость являлась реактивной нагрузкой, и максимальная передаваемая мощность составила лишь 750 Вт.

Так как система передачи работает на относительно высоком напряжении (950 В), был измерен уровень электромагнитного излучения для сравнения с уровнем СанПиН [6, 7]. Измерения максимальных значений напряженности переменных электрического и магнитного полей на рабочих местах персонала в полосе частот 2 кГц – 400 кГц проводились в 3-х точках (на высоте 0,7, 1,5 и 2 м от пола) вдоль линии электропередачи, подвешенной в воздухе на высоте 3 м. Результаты измерений приведены в табл. 3.

По результатам измерений установлено, что максимальные значения переменного электрического поля в диапазоне частот 2–400 кГц составили 100–150 В/м, что значительно ниже предельно допустимого уровня (ПДУ) на рабочих местах персонала, равного 500 В/м, и максимальные значения переменного магнитного поля в диапазоне частот 2–400 кГц составили величину 0,6–1,7 мкТл, что также значительно ниже ПДУ на рабочих местах персонала, равного 62,5 мкТл.

Оценка результатов измерений представлена в соответствии с действующими в России СанПиН 2.2.4.1191-03 и СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03.

Заключение. 1. КПД оборудования резонансной системы передачи электроэнергии на основе данных табл. 1 составляет более 80 %.

2. Показана возможность передачи электроэнергии по одному проводу мощности 2000 Вт с применением индивидуального заземления приемного преобразователя, при этом максимальное передаваемое расстояние может достигать 5000 м.

3. При сравнительных испытаниях резонансной системы передачи электроэнергии с аналогичным напряжением линии электропередачи на частоте 7 кГц максимальная передаваемая мощность составила 2500 Вт против 750 Вт при передаче на частоте 50 Гц.

4. Резонансная линия безопасна, не создает шагового напряжения, а уровень электромагнитных полей удовлетворяет требованиям СанПиН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия сельского хозяйства России на период до 2020 года. М.: ВИЭСХ, 2009. 36 с.
2. Юферев Л. Ю., Рошин О. А., Александров Д. А. Основные проблемы и их устранение при проектировании РОС // Инновации в сельском хозяйстве. 2013. № 1 (3). С. 18–24.
3. Юферев Л. Ю., Стребков Д. С., Рошин О. А. Экспериментальные модели резонансных систем электрической энергии. М.: ВИЭСХ, 2010. 180 с.
4. Электрификация транспорта на переменном токе промышленной частоты повышенного напряжения / сост. под руководством акад. М. П. Костенко. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 35 с. (Вопросы советской науки).
5. Способ и устройство передачи электрической энергии: патент РФ № 2423772: МПК H02J 17/00 (2006.01) / Л. Ю. Юферев, Д. С. Стребков. Опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19.
6. Исследование резонансной системы передачи электроэнергии на повышенной частоте / Л. Ю. Юферев [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 8 (148). С. 89–93.
7. Юферев Л. Ю., Рошин О. А., Александров Д. В. Результаты испытаний резонансной системы передачи электроэнергии // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 7 (129). С. 60–64.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМОЛЕНКО Дмитрий Владимирович,
д-р техн. наук, доцент, заведующий аспирантурой,
АО «ВНИИЖТ»

ЮФЕРЕВ Леонид Юрьевич,
д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник,
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

РОШИН Олег Алексеевич,
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Статья поступила в редакцию 05.07.2018 г., принята к публикации 28.09.2018 г.

Test results of resonant single wire system transmitting power to the infrastructure objects of the JSC “RZD”

D. V. ERMOLENKO¹, L. Yu. YUFEREV², O. A. ROSHCHIN²

¹ Joint Stock Company “Railway Research Institute” (JSC “VNIIZhT”), Moscow, 129626, Russia

² Federal State Budgetary Institution “Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM”, (FGBNU FSAEC VIM), Moscow, 109428, Russia

Abstract. The paper provides test results of pilot sample of resonant single wire transmission system to a distance of 2000 m at a higher frequency. Cable power lines used as the power line based on coaxial cable. Operating principle of resonant single-wire transmission system is based on the use of two resonance transformers with frequency of 5–15 kHz, wire line voltage between the line is 1–10 kV when operating in a resonant mode. Resonant power transformers consist of a resonant circuit and step-up/step-down winding. Resonance system for high efficiency energy transfer system when adjusting all parameters at certain voltage, frequency and load. With the set of equipment, which operates at a frequency of 7–9 kHz and at a voltage of 980 V, power line can transmit electricity on a single transmission line up to 3000 watts.

The article describes the possibility of applying a resonant single-wire power transmission system at a frequency of about 7 kHz for the transmission of electric power up to 3 kW from a stationary power supply system (three-phase voltage is 380 V AC, 50 Hz) for single-phase load, and earthed on the individual earthing inverter.

Efficiency of resonant single-wire electric power transmission system increases with increasing load capacity. It can reach 88–91 % directly at the maximum load with efficient conversion equipment.

Measurements of electromagnetic fields from unscreened power lines were carried out. The results of the measurements show that the maximum value of the alternating electric field in the frequency range of 2–400 kHz is 100–150 V/m, well below the maximum permissible level. The advantage of the resonance system compared to a single-phase system is in operating at the frequency of 7 kHz.

Keywords: resonant single wire system; electric power transmission; frequency converter; resonant contour

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-295-300>

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya sel'skogo khozyaystva Rossii na period do 2020 goda* [Energy strategy of agriculture of Russia for the period up to 2020]. Moscow, VIESKh Publ., 2009, 36 p.
2. Yuferev L. Yu., Roshchin O. A., Aleksandrov D. A. *Osnovnye problemy i ikh ustraneniye pri proektirovaniy ROS* [The main problems and their elimination when designing ROS]. Innovatsii v sel'skom khozyaystve, 2013, no. 1 (3), pp. 18–24.

3. Yuferev L. Yu., Strebkov D. S., Roshchin O. A. *Eksperimental'nye modeli rezonansnykh sistem elektricheskoy energii* [Experimental models of resonant systems of electrical energy]. Moscow, VIESKh Publ., 2010, 180 p.

4. Kostenko M. P. *Elektrifikatsiya transporta na peremennom toke promyshlennoy chastoty povyshennogo napryazheniya* [Electrification of transport on alternating current of industrial frequency overvoltage]. Moscow, Publishing house of RAS USSR, 1957, 35 p.

5. Yuferev L. Yu., Strebkov D. S. *Method and device for transmission of electrical energy*. Patent RF no. 2423772, publ. July 10, 2011, Bul. no. 19.

6. Yuferev L. Yu., Roshchin O. A., Aleksandrov D. V., Sokolov A. V. *Issledovanie rezonansnoy sistemy peredachi elektroenergii na povyshennoy chastote* [Study of the resonant system of transmission of electricity at an increased frequency]. Alternativnaya Energetika i Ekologiya [Alternative energy and ecology], 2014, no. 8 (148), pp. 89–93.

7. Yuferev L. Yu., Roshchin O. A., Aleksandrov D. V. *Rezultaty ispytaniy rezonansnoy sistemy peredachi elektroenergii* [Test results of the resonant transmission system]. Alternativnaya Energetika i Ekologiya [Alternative energy and ecology], 2013, no. 7 (129), pp. 60–64.

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy V. ERMOLENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Post-Graduate Department, JSC “VNIIZhT”

Leonid Yu. YUFEREV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher, FGBNU FSAEC VIM

Oleg A. ROSHCHIN,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, FGBNU FSAEC VIM

Received 05.07.2018

Accepted 28.09.2018

■ E-mail: Ermolenko.Dmitry@vniizht.ru (D. V. Ermolenko)

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (499) 260-43-19, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru, <https://vestnik.vniizht.ru/jour>.

Подписчики зарубежных стран могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).