Статья поступила в редакцию 21.04.14. Ред. рег. № 1983 The article has entered in publishing office 21.04.14. Ed. reg. No. 1983

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Л.Ю. Юферев, О.А. Рощин, Д.В. Александров, А.В. Соколов

Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ)
109456 Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2
Тел.: (499)171-19-20, факс: (499)170-51-01, e-mail: leouf@ya.ru

Заключение совета рецензентов: 25.04.14 Заключение совета экспертов: 30.04.14 Принято к публикации: 04.05.14

В статье представлены сведения о составе оборудования резонансных систем передачи электроэнергии. Сведения о принципе работы и основные расчетные данные, а также сравнение с известными системами передачи электроэнергии по однопроводным линиям электропередачи.

Приведены расчетные и экспериментальные данные об уровне электромагнитных полей от резонансной линии электропередачи.

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

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

RESEARCH OF RESONANT SYSTEM OF TRANSFER OF THE ELECTRIC POWER AT AN INCREASED FREQUENCY

L.Yu. Yuferev, O.A. Roschin, D.V. Aleksandrov, A.V. Sokolov

All-Russia Scientific-Research Institute for Electrification of Agriculture (GNU VIESH)
2, 1st Veshnyakovsky pr., Moscow, 109456, Russia
Tel.: (499)171-19-20, fax: (499)170-51-01, e-mail: leouf@ya.ru

Referred: 25.04.14 Expertise: 30.04.14 Accepted: 04.05.14

The article presents information about the composition of equipment resonant transmission systems of electronic electricity. Information about the operating principle and the basic data for calculation and comparison with known systems of transmission on a single-wire transmission lines.

The calculated and experimental data on the level of electromagnetic fields from resonant transmission line.

Keywords: single-wire resonant system, electric power transmission, frequency converter, resonant contour.

Резонансные системы передачи электрической энергии по однопроводниковой кабельной или воздушной линиям на повышенной частоте включают устройства преобразования частоты, линии электропередачи и устройства обратного преобразования напряжения в необходимое потребителю.

Принцип работы резонансной системы электропередачи основан на использовании двух трансформаторов, работающих на повышенной частоте 5-15 кГц, и однопроводной линии между ними с напряжением линии 1-10 кВ при работе в резонансном режиме (рис. 1). Передающий трансформатор является резонансным, задающим частоту работы системы передачи электроэнергии, а приемный трансформатор – широкополосный понижающий. При этом в качестве второго провода используется заземление, или к обмоткам трансформаторов подключаются емкости *C*3, *C*4, выполненные из проводящего материала и имеющие достаточный размер для передачи электрической энергии, или в случае, если между передающим и приемным блоком имеются диэлектрические пласты грунта, эти емкости могут служить обкладками одного конденсатора.

Резонансный передающий трансформатор состоит из силового резонансного контура *C*2*L*1 и повышающей/понижающей обмотки *L*2 [1]. Из-за того что приемный трансформатор не оказывает влияния на резонансную частоту системы передачи электроэнергии, к линии электропередачи можно подключать их любое количество с суммарной мощностью, не превышающей мощность передающего преобразователя напряжения.

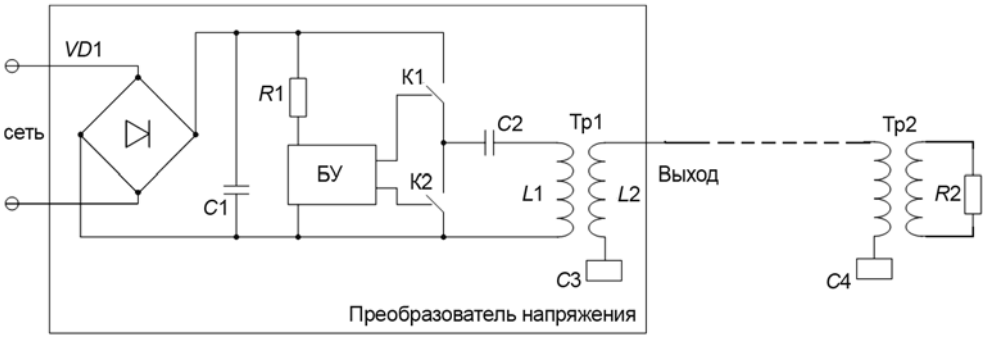

Рис. 1. Структурная схема резонансной системы передачи электроэнергии
Fig. 1. Structural scheme of resonant transmission system

Основными узлами резонансного преобразователя являются силовые ключи К1, К2, блок управления БУ и резонансный трансформатор, состоящий из емкости $C2$ и обмоток $L1$ и $L2$, при этом резонансная частота в основном определяется параметрами элементов $C2L1$, на частоту оказывает также влияние емкость линии электропередачи, которая через трансформатор Тр1 добавляется к задающему конденсатору $C2$ и, соответственно, понижает собственную резонансную частоту контура $C2L1$.

Нагрузкой резонансного преобразователя напряжения является эквивалентная нагрузка силового контура R (рис. 2).

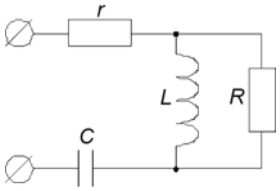

Рис. 2. Схема нагруженного контура: R – сопротивление нагрузки контура; L, C – резонансные элементы контура; r – внутреннее сопротивление резонансного контура
Fig. 2. The scheme is loaded outline: R is the load resistance of the circuit; L, C – rezo-spectrum of the circuit elements; r – internal resistance of the resonant circuit

Максимальная выходная мощность преобразователя зависит от напряжения, подаваемого на контур, напряжения на контуре, емкости контура, частоты и других параметров. Расчет максимальной выходной мощности резонансного контура производится на основе формулы добротности нагруженного контура [1]:

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R} = \frac{R\left(U_{\text{вх}}\omega C\right)^2}{1,69} = \left(\frac{U_{\text{вх}}\sqrt{L/C}}{r + \left(\sqrt{L/C}\right)^2 / R}\right)^2 R^{-1},$$

где $U_{\text{вых}}$ – напряжение на контуре, В; $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение контура (выходное напряжение преобразователя частоты), В; R – сопротивление нагрузки контура, Ом; C – емкость контура, Ф; L – индуктивность обмотки 1, Гн; r – внутреннее сопротивление контура, Ом.

Основным элементом, задающим мощность резонансного преобразователя при заданной частоте, является емкость конденсатора контура. Емкость контура можно рассчитать по формуле, выведенной на основе экспериментальных данных [2]:

$$C = \frac{P_{\text{вых}} Q K_{\text{ф}}}{U_{\text{вых}}^2 \omega} = \frac{P_{\text{вых}} K_{\text{ф}}}{U_{\text{вых}} U_{\text{вх}} \omega},$$

где Q – добротность нагруженного контура; $P_{\text{вых}}$ – максимальная мощность, снимаемая с контура, Вт; $K_{\text{ф}}$ – коэффициент формы сигнала (в случае прямоугольной формы выходного сигнала преобразователя частоты $K_{\text{ф}}$ зависит от скорости переключения ключей $K1$, $K2$ ($K_{\text{ф}} \approx 1,3$)).

Индуктивность контура рассчитывается известной формулой $L = \left(\omega^2 C\right)^{-1}$.

Для уменьшения массогабаритных размеров трансформаторов необходимо применять сердечники. Число витков силовой обмотки рассчитывается по известной формуле следующим образом:

$$W = \sqrt{\frac{L\delta}{1,25 \cdot 10^{-7} S_{\text{с}} K_{\text{с}}}},$$

где $S_{\text{с}}$ – площадь сечения магнитопровода, см^2; $K_{\text{с}}$ – коэффициент заполнения магнитопроводящим материалом (≈1,0); δ – суммарный зазор, мм.

Приемный трансформатор на основе магнитомягкого сердечника рассчитывается при помощи стандартных методик.

Изменением частоты можно менять передаваемую мощность, например, для систем освещения птицеводческих помещений. Данные системы передачи электроэнергии существенно снижают капитальные затраты на электрификацию зданий и территорий.

Резонансные системы обеспечивают высокую эффективность передачи энергии при настройке всей системы на определенные параметры напряжения, частоты и нагрузки. Однако современный электропотребитель имеет меняющуюся во времени нагрузку,

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

© Scientific Technical Centre «TATA», 2014

при этом выходное напряжение на приемной стороне также меняется в несколько раз, что недопустимо при эксплуатации электрооборудования (рис. 3).

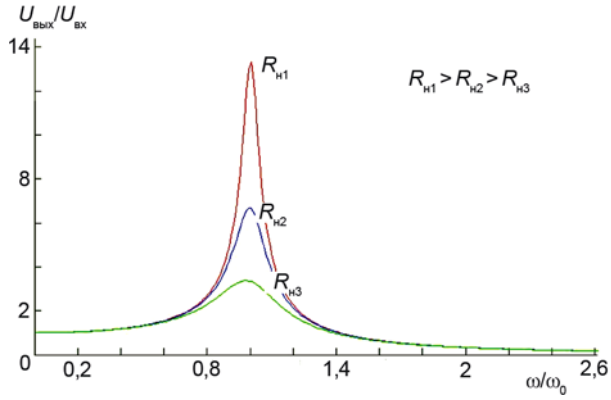

Рис. 3. Зависимость выходного напряжения от нагрузки в резонансной системе передачи электроэнергии
Fig. 3. The dependence of the output voltage on the load in the resonant transmission system

Для решения этой проблемы была разработана резонансная система передачи электроэнергии со стабилизацией выходного напряжения [3].

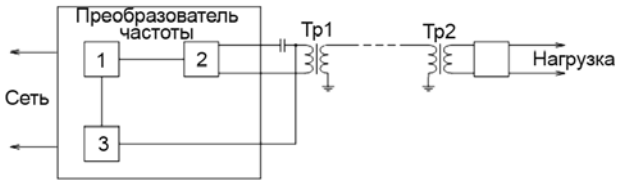

Рис. 4. Структурная схема резонансной системы передачи электроэнергии со стабилизацией выходного напряжения
Fig. 4. Structural scheme of resonant transmission system with stabilization of the output voltage

В этом устройстве (рис. 4) силовой элемент *2* управляется задающим генератором *1*, частоту и напряжение которого подстраивают под напряжение линии электропередачи блоком управления *3*. Таким образом, независимо от нагрузки напряжение в линии электропередачи остается стабилизированным.

Если сравнивать однопроводные системы передачи электроэнергии, то среди них резонансная система передачи повышенной частоты (РОС) имеет максимальную эффективность среди однопроводных ЛЭП всех типов.

Используемые многие десятилетия системы один провод – земля 50-60 Гц (НЧЛЭП) (> 300 кВА, > 80 кВ, > 200 км) [4] эффективны только для хорошо проводящих почв и при высококачественном заземлении (например, экстразаглубление для сухих почв в Австралии). В однопроводных системах передачи электроэнергии постоянного тока (ЛПТ) требования к заземлению еще более высоки: катод – медь, анод – графит или титан. Все эти меры, применяемые в обычных системах НЧЛЭП и ЛПТ, не позволяют достичь таких высоких КПД, как для резонансных линий электропередачи повышенной частоты (ЛПЧ). Причина эффективности ЛПЧ – с повышением частоты сопротивление диэлектрических компонентов почвы падает.

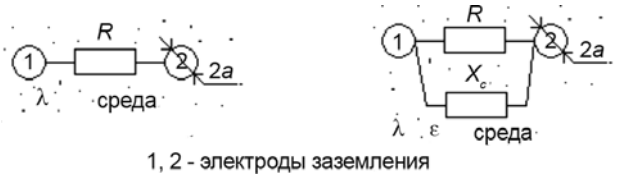

Рис. 5. Сопротивление среды для НЧ и ВЧ токов
Fig. 5. The resistance of the medium to low and high frequency currents

Классическая формула [5] сопротивления среды между двумя шаровыми электродами радиуса *a*, погруженными в безграничную однородную среду с удельной электрической проводимостью λ (рис. 5), показывает, что сопротивление не зависит от расстояния между электродами даже для постоянного тока: $R = U/i = (2\pi a\lambda)^{-1}$, где *a* – радиус электродов.

В реальности это невыполнимо из-за наличия в Земле мощных слоев диэлектриков с λ = 0. Это гравий, пески, граниты, просто сухие почвы и др. Именно поэтому для НЧЛЭП и ЛПТ системы сталкиваются с проблемами «λ почвы и качества заземления». В резонансных линиях электропередачи с ростом частоты сопротивление перестает зависеть от «λ почвы и качества заземления».

На повышенных частотах работают оба сопротивления, активное и реактивное, т.к. реальная среда имеет ненулевые как активную, так и реактивную проводимости. Становится возможным использование, кроме стандартных глубинных, также поверхностных площадных заземлений, например, высокогорных озер. Это возможное решение для передачи энергии в скальных массивах.

Реактивное сопротивление между двумя электродами заземления ЛЭП

$$X_c = \frac{1}{4\pi^2 af\varepsilon\varepsilon_0}.$$

где *f* – частота, Гц; ε – диэлектрическая проницаемость грунта; $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ – электрическая постоянная.

Результирующее сопротивление между двумя электродами заземления ЛЭП

$$X = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{X_c}\right)^{-1} = \frac{RX_c}{R + X_c}.$$

Ниже приведен пример однопроводной линии (рис. 6), которая из-за наличия диэлектрического пласта (например, кремнеземы, пески SiO_2) не будет

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

работать как НЧЛЭП и ЛПТ, но будет работать как ЛПЧ. Это пример, включающий мощную прослойку полностью непроводящего ($\lambda \to 0$, гранит, песок и т.п.) диэлектрика между электродами заземления приемника и передатчика.

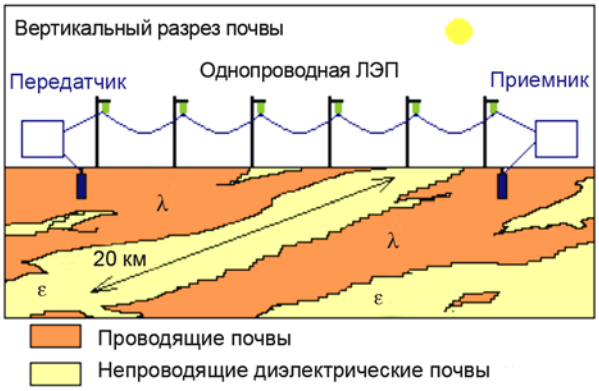

Рис. 6. Принцип передачи электроэнергии на повышенной частоте реактивным током в диэлектрике почвы
Fig. 6. The principle transmission at high frequency reactive current dielectric ground

Так, сопротивление заземления для случая НЧЛЭП и ЛПТ: $R = (2\pi a\lambda)^{-1}$, для $\lambda = 0$: $R = \infty$, линия не проводит электроэнергию. КПД линии = 0%.

Сопротивление для случая повышенной частоты:

$$X_c = \frac{1}{4\pi^2 af\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{1}{4\pi^2 20000 \cdot 10000 \cdot 4 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}} \approx 3{,}5\,,$$

где f = 10000 Гц – рабочая частота; ε = 4 для кремнезема; a = 20000 м.

При этом потери в заземлении для системы передачи электроэнергии ЛПЧ с параметрами 30 км, 10 кВт, 1 кВ: $P_п = I2 \cdot R = (P/U)^2 \cdot X_c \approx$ (10000 Вт/1000 В)·2·3,5 Ом = = 350 Вт, КПД линии = 96,5% (350 Вт/10000 Вт), только с учетом реактивной проводимости, но в реальности прибавится обычная активная проводимость и КПД растет. В породе, прослоенной водой с растворенными в ней солями, ε может достигать значений 10-100 и более, например, для воды ε = 80-88 для t = = 20-0 °С [6]. Это, соответственно, снижает реактивное сопротивление и КПД линии растет.

Следовательно, в случае ЛПЧ энергия передается токами смещения в диэлектрике непроводящего слоя почвы. Верхняя и нижняя проводящие зоны (рис. 6) работают как обкладки конденсатора (сложность распределения зарядов в земле может привести даже к эффекту ионистора (рост емкости), например, при сильной пористой структуре среды). Также обкладками конденсатора могут выступить два водных горизонта, разделенных непроводящим диэлектриком (слоем гнейсов, гранитов и т.п.). Поэтому резонансные системы передачи электроэнергии, работающие на повышенной частоте, оказываются менее требовательными к качеству заземления [7].

Уменьшить потери в заземлении можно увеличением рабочей частоты. Подход к рубежу 100-300 кГц позволяет резко уйти от зависимости от λ среды и передавать большую часть энергии за счет ε среды. Но при этом появляется задача, как уменьшить влияние резонансных свойств самой линии электропередачи, которая имеет емкость, индуктивность и добротность. При этом в отдельных участках линии электропередачи появляются перенапряжения, особенно при работе без нагрузки. Наиболее простым вариантом является установка активных компенсаторов в приемных блоках, которые при появлении нагрузки и уменьшении напряжения в линии электропередачи будут автоматически отключаться.

Поскольку резонансные системы работают на повышенной частоте с повышенным напряжением, в однопроводной неэкранированной линии электропередачи присутствует электромагнитное излучение.

Электрическое поле $E(y)$ однопроводной линии электропередач, находящееся на уровне земли и представляющее собой вертикальную составляющую общего электрического поля, вычисляют по формуле [8]

$$E(y) = 120I\frac{h}{h^2 + y^2}\,, \qquad (1)$$

где I – ток, распространяющийся по проводу, А; h – высота провода над землей, м; y – расстояние между проекцией провода на землю и точкой измерения, м.

Магнитное поле бесконечно длинного проводника [9] вычисляется по следующей формуле:

$$B = \mu_0 I / 2\pi r\,, \qquad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; r – расстояние между проводником и точкой измерения, м.

Напряженность электрического поля и магнитное поле, полученные по (1) и (2) для линии электропередачи с напряжением 1000 В и током 4 А на частоте 6 кГц, подвешенной в воздухе на высоте 2,5 м от пола, приведены в таблице.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных уровня электромагнитного излучения

The comparison of calculated and experimental data electromagnetic radiation level

y, м	$E(y)$, В/м		B, мкТл	
	расч.	эксп.	расч.	эксп.
0,7	178,0	150,0	1,14	1,7
1,5	141,2	120,0	0,54	0,9
2	117	100,0	0,4	0,6

Полученные результаты удовлетворяют предельно допустимым уровням напряженности электрического (500 В/м) и магнитного (62,5 мкТл) полей на рабочих местах, согласно СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 [10], и совпали с экспериментальными данными.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

© Scientific Technical Centre «TATA», 2014

Выводы

1. Однопроводные системы передачи электроэнергии, работающие на повышенной частоте, являются более эффективными по сравнению с линиями один провод – земля, работающими на постоянном токе и на переменном токе промышленной частоты.

2. Показана возможность передачи электроэнергии по одному проводу с использованием непроводящих сред между передающим и приемным устройством в качестве заземления.

3. Резонансные системы передачи электроэнергии для электроснабжения потребителей должны иметь функцию стабилизации выходного напряжения.

4. В резонансной линии электропередачи уровень электромагнитных полей удовлетворяет требованиям СанПиН.

Список литературы

1. Юферев Л.Ю., Стребков Д.С., Рощин О.А. Экспериментальные модели резонансных систем электрической энергии. М.: ВИЭСХ, 2010.

2. Юферев Л.Ю. Повышение эффективности резонансных систем освещения и облучения // Вестник ВИЭСХ. 2013. № 3 (12). С. 55-58.

3. Патент РФ № 2 423 772. МПК H02J 17/00. Способ и устройство передачи электрической энергии (варианты) / Юферев Л.Ю., Стребков Д.С. // Опубликовано 10.07.2011. Бюл. № 19.

4. Single-wire earth return [электронный ресурс] http://en.wikipedia.org/wiki/Single-wire_earth_return.

5. Калашников С.Г. Электричество, § 63. Заземление в линиях связи. М.: Физматлит, 2004.

6. Диэлектрики [электронный ресурс] http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_constant.

7. Александров Д.А., Юферев Л.Ю. Возможность применения резонансной системы электропитания для катодной защиты // Инновации в сельском хозяйстве. 2012. № 2 (2). С. 46-53.

8. Бабенко А.Н. Электромагнитные поля и волны: учебное пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технологический ун-т, 2012.

9. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны. М.: Советское радио, 1971.

10. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов».

References

1. Ûferev L.Û., Strebkov D.S., Roŝin O.A. Èksperimental'nye modeli rezonansnyh sistem èlektričeskoj ènergii. M.: VIÈSH, 2010.

2. Ûferev L.Û. Povyšenie èffektivnosti rezonansnyh sistem osveŝeniâ i oblučeniâ // Vestnik VI-ÈSH. 2013. № 3 (12). S. 55-58.

3. Patent RF № 2 423 772. MPK H02J 17/00. Sposob i ustrojstvo peredači èlektričeskoj ènergii (varianty) / Ûferev L.Û., Strebkov D.S. // Opublikovano 10.07.2011. Bûl. № 19.

4. Single-wire earth return [èlektronnyj resurs] http://en.wikipedia.org/wiki/Single-wire_earth_return.

5. Kalašnikov S.G. Èlektričestvo, § 63. Zazemlenie v liniâh svâzi. M.: Fizmatlit, 2004.

6. Dièlektriki [èlektronnyj resurs] http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_constant.

7. Aleksandrov D.A., Ûferev L.Û. Vozmožnost' primeneniâ rezonansnoj sistemy èlektropitaniâ dlâ katodnoj zaŝity // Innovacii v sel'skom hozâjstve. 2012. № 2 (2). S. 46-53.

8. Babenko A.N. Èlektromagnitnye polâ i volny: učebnoe posobie. Joškar-Ola: Povolžskij gos. tehnologičeskij un-t, 2012.

9. Gol'dštejn L.D. Èlektromagnitnye polâ i volny. M.: Sovetskoe radio, 1971.

10. SanPiN 2.1.8/2.2.4.1383-03 «Gigieničeskie trebovaniâ k razmeŝeniû i èkspluatacii peredaûŝih radiotehničeskih ob"ektov».

Транслитерация по ISO 9:1995

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"