

НИКОЛА ТЕСЛА И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

к 150-летию со дня рождения Николы Теслы – 10 июля 1856 г.

Стребков Д.С., академик РАСХН, докт. техн.наук,
зав. кафедрой ЮНЕСКО и МГАУ «Возобновляемая
энергетика и сельская электрификация»
Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), Москва

Для инженера-электрика, изучавшего классический курс электротехники в течение трех семестров и работающего в энергетической или сетевой компании, будет весьма трудно поверить и понять, что существует другая электротехника, в которой.

- Для протекания тока не обязательно иметь замкнутую цепь из двух проводников между генератором и нагрузкой.

- Ток может протекать по однопроводной линии, так же, как вода по трубе в школьной задаче из верхнего бассейна перетекает в нижний или как теплота от горячего конца теплопроводящего бруска движется к холодному концу. Впервые В. Томсон указал на аналогию между теплопроводностью и электростатикой, а Д. Максвелл — на аналогию между гидродинамикой и электродинамикой.

- В однослойной катушке с проводом фазовая скорость движения электромагнитной волны вдоль оси катушки может быть в сотни раз меньше, чем в воздушной линии электропередачи или скорости света в свободном пространстве.

- Ток изменяется по длине линии в разных витках катушки и в разных частях однопроводниковой линии и может иметь любые локальные значения, в том числе и равные нулю. Более того, в разных участках однопроводной цепи ток может быть направлен в противоположные стороны.

Однако такое необычное поведение тока с точки зрения классического инженера-электрика совсем не кажется странным радиоинженеру, для которого лучевая антенна и однопроводниковый волновод являются классическими примерами однопроводниковых линий [1, 2]. В таких линиях существуют стоячие и бегущие волны тока и напряжения, а цепь замыкается токами смещения в пространстве, окружающем однопроводниковую линию. Д. Максвелл писал: «Исключительная трудность согласования законов электромагнетизма с существованием незамкнутых электрических токов — одна из причин среди многих, почему мы

должны допустить существование токов, создаваемых изменением смещения». При высокой частоте однослойная электрическая катушка из классической индуктивности превращается в различных вариантах использования в замедляющую систему или линию задержки электромагнитных волн, в спиральный волновод, спиральную антенну или электрический резонатор с распределенными параметрами, которые невозможно определить, используя классическую теорию расчета электрических цепей.

Все рассмотренные выше эффекты в однопроводниковой линии и в спиральных катушках существуют и при частотах 1-100 кГц и их можно использовать для передачи электрической энергии. Более того, в связи с ограничениями, накладываемыми потерями на излучение из-за антенного эффекта, указанная область частот наиболее пригодна для передачи электрической энергии по однопроводниковому волноводу. К сожалению, эта область частот специалистов по радиотехнике мало интересует, а инженеры-электрики недостаточно подготовлены для работы на стыке электротехники и радиотехники.

Впервые передачу электроэнергии по однопроводниковой линии на повышенной частоте предложил и осуществил Н. Тесла более 100 лет назад [3]. Н. Тесла рассматривал свою резонансную однопроводниковую систему передачи электрической энергии как альтернативу системе передачи энергии на постоянном токе, предложенной Т. Эдисоном. 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. Экспериментально доказано, что однопроводниковая линия с высокочастотным резонансным трансформатором Тесла в начале линии может передавать электрическую энергию на любой, в том числе и на нулевой частоте, то есть на выпрямленном токе. Однопроводниковые резонансные

системы (рис. 1, 2) открывают возможности для создания сверхдальних кабельных линий электропередачи и, в перспективе, замены существующих воздушных линий на кабельные однопроводниковые линии [4]. Тем самым будет решена одна из важнейших проблем электроэнергетики — повышение надежности электроснабжения.

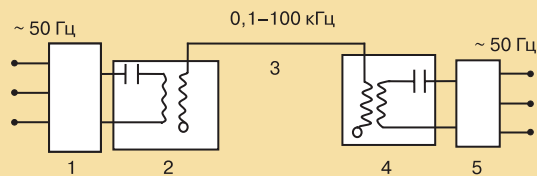


Рис. 1. Резонансная система передачи электрической энергии

1 — преобразователь; 2, 4 — резонансные высокочастотные трансформаторы Тесла; 3 — однопроводниковая высоковольтная линия; 5 — инвертор

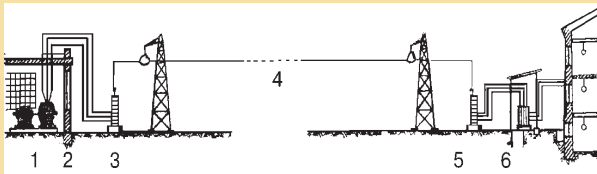


Рис. 2 Однопроводниковая резонансная энергетическая система

1 — электрический генератор, 50 Гц (1-100 кГц);
2 — преобразователь частоты 50 Гц/1-100 кГц (отсутствует, если генератор имеет частоту 1-100 кГц);
3 — повышающий высокочастотный трансформатор 0,4 кВ/10-50 кВ, 1-100 Гц;
4 — однопроводная линия 10-500 кВ;
5 — понижающий высокочастотный трансформатор 10-500 кВ/0,4 кВ, 1-100 кГц;
6 — инвертор 1-10 кГц/50 Гц

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

Стоячие волны в разомкнутой однопроводниковой линии (рис. 3) 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° во времени и в пространстве. В сечениях линии с пучностями напряжения наблюдаются узлы тока, а при узлах напряжения — пучности тока. Средняя мощность, отдаваемая генератором в однопроводниковую линию без потерь или в линию, замкнутую на реактивное сопротивление, равна нулю [2].

Если линия работает в режиме стоячих волн, то ее входное сопротивление имеет реактивный характер. Если в линии имеются потери, то некоторая бегущая

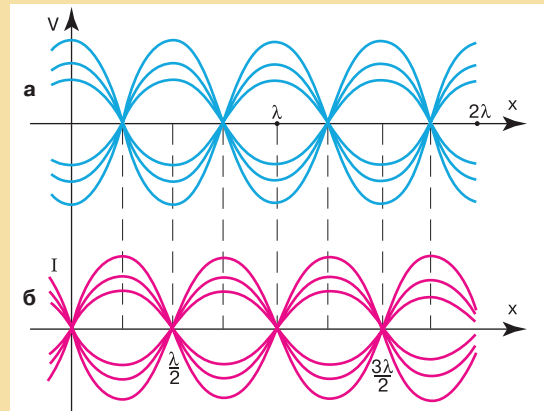


Рис. 3. Стоячие волны

а — напряжение; б — ток в разомкнутой линии

волна от генератора компенсирует эти потери. При наличии бегущих и стоячих волн в линии ее входное сопротивление содержит активную и реактивную составляющие.

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 [4].

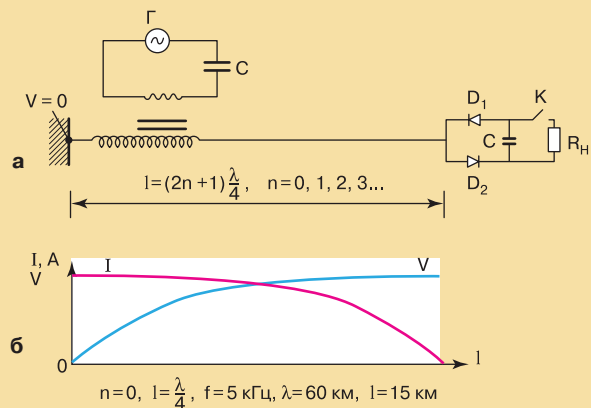


Рис. 4. Электрическая схема (а) и распределение токов и напряжений (б) в четвертьволновой однопроводниковой резонансной линии, разомкнутой со стороны нагрузки (или с нагрузкой в виде емкости)

G — генератор; C — емкость резонансного контура; D_1 и D_2 — диодные блоки; C_H — емкость нагрузки; K — электронный ключ; R_H — сопротивление нагрузки

На рис. 5 представлены распределение волн тока и напряжения в однопроводниковой линии, замкнутой на землю с обоих концов [4]. Классический инженер-электрик, посмотрев на электрическую схему на рис. 5 (а, б), 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

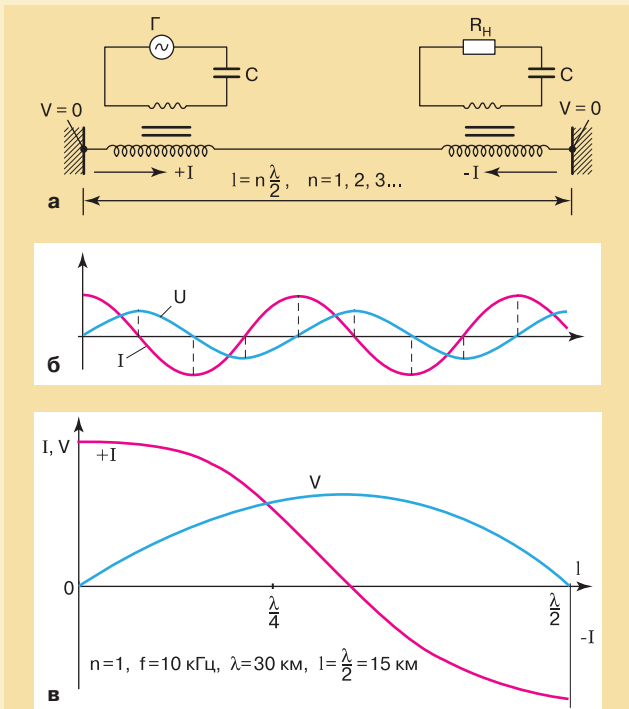


Рис. 5. Распределение токов и напряжений в однопроводниковой линии, замкнутой с двух сторон на землю

- а — электрическая схема (Г — высокочастотный генератор, R_н — сопротивление нагрузки, С — емкость резонансного контура);
 б — распределение стоячих волн тока и напряжения вдоль однопроводниковой линии;
 в — распределение токов и напряжений в полуволновой однопроводниковой линии

сдвигом фаз между током и напряжением 90° , 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.

При работе в режиме стоячих волн вектор Умова-Пойнтинга через каждые четверть периода изменяет свое направление на обратное: от генератора к нагрузке и наоборот (рис. 6). Это объясняется тем, что в линии имеется сдвиг по фазе между напряжением и током, соответственно, между напряженностями электрического и магнитного полей, на 90° , вследствие чего через каждые четверть периода один из векторов E или H изменяет свое направление на обратное. Таким образом, подтверждается, что на создание чисто стоячих волн генератор не затрачивает энергии [2].

Стационарные или стоячие волны на рис. 6 являются для инженера-электрика явлением, не имеющим реального физического содержания, поскольку длина линий электропередачи обычно не превышает 1000 км, а длина волны тока и напряжения при 50 Гц составляет 6000 км. Полуволновая линия (см. рис. 5, в) длиной 1000 км может быть получена при частоте 150 Гц, и даже в двух-трехпроводном классическом исполнении

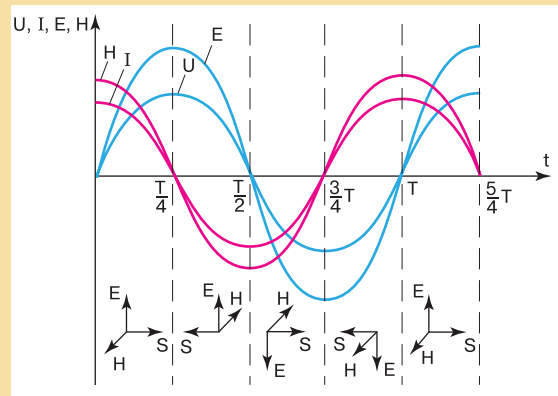


Рис. 6. Направление вектора Умова-Пойнтинга \vec{S} в случае работы однопроводниковой линии в режиме стоячих волн

I, H — волны тока и напряженности магнитного поля;
 V, E — волны напряжения и напряженности электрического поля

такая линия будет передавать значительно большую мощность, чем при частоте 50 Гц. Однако классические линии электропередачи проявляют резонансные свойства только в аварийном режиме, например, при обрыве линии у потребителя. Для понимания трудов Н. Теслы и развития его идей по резонансным электротехнологиям необходимо классический курс электротехники для инженеров-электриков дополнить специальным курсом, содержащим сведения о резонансных линиях, работающих на повышенной частоте, принципах работы однопроводниковых и спиральных волноводов, методах расчета элементов электрических цепей с распределенными параметрами, об основных научных результатах и практических достижениях в области резонансных электрических технологий и перспективах их использования.

На рис. 7-9 показаны компоненты резонансной однопроводниковой кабельной системы передачи энергии электрической мощностью 20 кВт с длиной кабеля 1,2 км, работающей на частоте 1 кГц в ВИЭСХ, а в таблице показаны результаты испытаний [4].



Рис. 7. Преобразователь частоты и резонансный контур передающего высокочастотного трансформатора



Рис. 8. Резонансный контур понижающего высокочастотного трансформатора

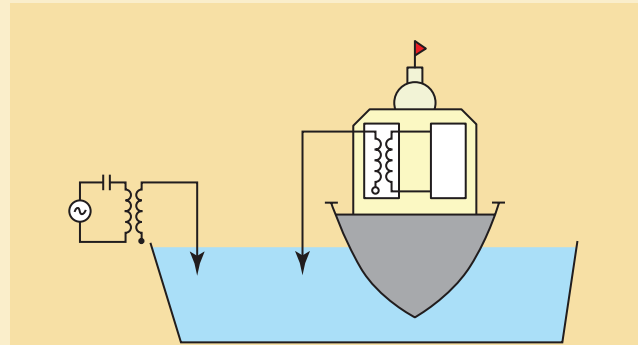


Рис. 10. Электрическая схема передачи электрической энергии на водный транспорт с использованием водной проводящей среды



Рис. 9. Испытания резонансной энергетической системы 20 кВт с однопроводниковой кабельной линией 1,2 км в лаборатории ВИЭСХ



Рис. 11. Испытания макета электрического речного судна в лаборатории ВИЭСХ с использованием водопроводной воды в качестве проводящей среды

Таблица

Результаты испытаний резонансной системы передачи электрической мощностью 20 кВт

Электрическая мощность на нагрузке, кВт	20,52
Ток, А	54
Напряжение, В	380
Напряжение линии, кВ	6,8
Частота линии, кГц	1
Длина линии	6 м 1,2 км
Диаметр провода линии	0,08 мм 1 мм
Максимальная эффективная плотность тока на единицу площади поперечного сечения проводника линии, А/мм ²	600
Максимальная удельная электрическая мощность в однопроводниковой линии, МВт/мм ²	4

Использование проводящих сред в резонансном методе передачи электрической энергии иллюстрируется на рис. 10-11, где модель электрического катера получает электрическую энергию для движения из бассейна с водопроводной водой и живыми рыбками. Передающий блок имеет электрическую мощность 100 Вт, напряжение 1 кВ.

В качестве источника электрической энергии в резонансной электрической системе может быть использована ветровая электростанция, солнечная батарея и т.д.

Другое глобальное применение резонансных однопроводниковых систем передач электроэнергии заключается в возможности создания бесконтактного высокочастотного электрического транспорта. Бесшлейфовый метод передачи электрической энергии на электротранспортное средство с использованием метода электромагнитной индукции через воздушный трансформатор и обычных двухпроводных линий передачи энергии имеет принципиальные ограничения по величине передаваемой мощности, КПД передачи и длине линии и поэтому в настоящее время не используется [5].

Разработанная в ВИЭСХ экспериментальная модель небольшого электрокара получает энергию от однопроводниковой изолированной кабельной линии, проложенной в дорожном покрытии (рис. 12). Ведутся работы по увеличению мощности бесконтактного привода и разработке коммерческого проекта резонансной электротранспортной системы. В перспективе можно представить большой цветущий зеленый город без выхлопных газов и смога, в котором под каждым рядом движения на главных магистралях установлена кабельная линия, и каждый автомобиль в дополнение к двигателю внутреннего сгорания имеет электрический мотор и бесконтактный троллей. Таким



Рис. 12. Макетный образец электромобиля с электро-снабжением от однопроводниковой кабельной линии, проложенной в дорожном покрытии

же образом может быть организовано движение на крупных автострадах между городами, в том числе с использованием автоматических электротранспортных средств, управляемых роботами и компьютерами.

Использование электрического бесконтактного привода в сельской энергетике открывает перспективы большой экономии топлива и создания беспилотных, управляемых компьютером со спутниковой навигацией роботов-автоматов для обработки земли, выращивания и уборки сельскохозяйственной продукции. В этом случае сельскохозяйственное производство превратится в фабрики на полях, организованное на принципах автоматизированных промышленных предприятий. Таким образом, могут быть решены еще три современные проблемы электроэнергетики – энергосбережение, снижение вредных выбросов и автоматизация сельскохозяйственного производства.

Третье направление использования резонансных однопроводниковых систем — это плазменные медицинские и технологические установки. Их отличие от обычных плазматронов заключается в том, что они имеют не два, а один электрод, который является началом однопроводниковой резонансной линии, а в качестве нагрузки используется емкость любого тела или обрабатываемого вещества. Разработанный в ВИЭСХе канд. техн. наук Верютиным В.И. резонансный коагулятор используется в медицине, в ветеринарии и в косметологии (рис. 13) [4]. Технологические одноэлектродные плазматроны могут иметь мощность в импульсе до 1010 Вт, в непрерывном режиме до 20 МВт и использоваться для уничтожения сорняков вместо пестицидов, получения жидкого биотоплива из органического сырья, в технологиях получения и очистки солнечного кремния, в физических экспериментах по изучению плазмы, например, при создании искусственных шаровых молний [6].

Четвертое направление использования резонансных систем — это создание глобальных и локальных инфокоммуникационных систем связи по однопроводниковым линиям. Этому направлению посвящено



Рис. 13. Резонансный холодноплазменный коагулятор

много работ Н. Теслы. Первые патенты аппаратов для передачи информации Н. Тесла разработал в 1899 г., получил в 1901 г. В 1943 г. Верховный Суд США признал приоритет Н. Теслы в споре с Р. Маркони в передаче электрических сигналов на расстоянии.

Каждая однопроводниковая линия имеет не одну, а большое число резонансных волн. Это позволяет использовать однопроводниковую линию как оптоволоконную линию для передачи одновременно большого объема информации различным пользователям. Специальное экранирование линий позволяет уменьшить потери амплитуды и качества сигнала при передаче информации на большие расстояния. Н. Тесла предложил методы кодирования и защиты информации от несанкционированного доступа. Инфокоммуникационные и энергетические системы в настоящее время являются главными факторами социального развития села и сельскохозяйственного производства на базе современных технологий.

Никола Тесла был гениальным ученым, предвидевшим развитие электротехники и энергетики на сотни лет вперед. Он получал напряжение 50 млн вольт простыми аппаратными средствами, передавал электрическую энергию на десятки километров, используя землю в качестве проводящей среды, испытывал катер, управляемый через водную среду, изобрел асинхронный электродвигатель, многофазный ток и многое другое. Н. Тесла был прекрасным конструктором механических систем. В музее Н. Теслы в Белграде хранятся великолепные чертежи различных механизмов, подписанные Н. Теслой. Из незлектрических изобретений до настоящего времени представляют интерес двигатель внутреннего сгорания без поршня и коленчатого вала, паровая и гидравлическая турбины без лопаток и механический аналог электрического диода — устройство, пропускающее поток газа и жидкости только в одном направлении. Гидравлическое сопротивление этого бесклапанного устройства в прямом и обратном направлении отличается в 300 раз. В настоящее время можно практически полностью повторить и развить резонансные технологии Н. Теслы по передаче электрической энергии с использованием однопроводниковых линий и проводящих сред.

Сохранилось очень мало информации о работах Н. Теслы по беспроводным методам передачи электрической энергии. Последний патент в этой области на «Аппарат для передачи электрической энергии» Н. Тесла разработал в 1902 г., переделал его в 1907 г. и получил патент в 1914 г. Из выступления Николы Теслы по случаю получения награды имени Томаса Эдисона на заседании Американского института инженеров-электриков 18 мая 1917 г.: «Что касается передачи энергии через пространство, это проект, который я давно считаю абсолютно успешным. Годы назад я мог передавать энергию без проводов на любое расстояние без ограничений, которые накладывались физическими размерами Земли. В моей системе нет различий, каково расстояние. Эффективность передачи может быть 96 или 97 %, и практически нет потерь, кроме таких, которые неизбежны для работы машины. Когда нет приемника, нет нигде потребления энергии...»

Когда нет приемников, станция потребляет только несколько лошадиных сил, необходимых для поддержания электромагнитных колебаний, она работает в режиме холостого хода, как станция Эдисона, когда лампы и моторы выключены...»

Высокую эффективность передачи легко объяснить при наличии стоячих волн в проводящем беспроводном канале (см. рис. 6).

Журнал «Time» писал 23 июля 1934 г.: «На прошлой неделе доктор Тесла объявил комбинацию из четырех изобретений, которые сделают войну бессмысленной. Существом идеи являются смертоносные лучи — концентрированный пучок субмикронных частиц, перемещающихся со скоростью, близкой к скорости света. Пучок, по словам Теслы, будет поражать армию на маршруте полета, сбивая эскадрильи самолетов на дистанции 250 миль (400 км). Изобретатель Тесла будет разряжать луч путем использования:

- прибора для сведения к нулю эффекта задержки частиц в атмосфере;
- метода создания высокого потенциала;
- процесса усиления этого потенциала до 50 млн вольт;
- создания гигантской электрической силы воздействия».

Никола Тесла умер 7 января 1943 г. в гостинице New Yorker на Манхэттене в комнате 3327 на 33 этаже. Сразу после его смерти из комнаты пропали научные работы, которые никогда не были найдены. Часть материалов содержала информацию о технологиях, которые могли быть использованы для беспроводной передачи энергии. Способы создания и усиления высокого потенциала Н. Тесла подробно описал в [3]. Беспроводные резонансные методы передачи электрической энергии с использованием проводящих каналов, сформированных лазерным излучением и электронными пучками, изложены в [4]. Однако остается неизвестным, как Н. Тесла осуществлял беспроводную передачу электрической энергии на частоте 20 - 100 кГц без использования лазеров, микроволнового излучения, релятивистских пучков электронов высоких энергий,

которых 100 лет назад просто не существовало. Научные труды Н. Теслы по резонансным методам передачи электрической энергии на современном уровне знаний и достижений электротехники открывают новые возможности развития электроэнергетики, электротехнологий, электрического транспорта и связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейнке Х., Гундлес Ф. Радиотехнический справочник. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960, т. 1.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны. — М.: Советское радио, 1968.
3. Nicola Tesla. Colorado Springs Notes 1889-1900. Published by Nolit, Beograd, 1978. 437 pp.
4. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи электрической энергии. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2004.
5. Розенфельд В.Е., Староскольский Н.А. Высоко-частотный бесконтактный электрический транспорт. — М.: Транспорт, 1975.
6. Корум К.Л., Корум Д.Ф. Эксперименты по созданию шаровой молнии при помощи высокочастотного разряда и электрохимические фрактальные кластеры. — М.: УФН, Изд. РАН, апрель 1990, т. 160, вып. 4.

Автор благодарен профессору Свистову В.М. за обсуждение волноводных систем передачи энергии, академику РАН Данилевичу Я.Б. и члену-корреспонденту РАН Лидоренко Н.С. за плодотворные дискуссии, рекомендации и поддержку данной работы.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ РЕКЛАМОДАТЕЛЕЙ

РАСЦЕНКИ на размещение рекламы в журнале

ЭЛЕКТРО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА • ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Тарифы на размещение рекламы указаны в у.е.
Вся реклама полноцветная (печатается в 4 краски)

Обложка 2-я	полоса	700
Обложка 3-я	полоса	600
Основная часть блока (формат А4)		
1/1	полосы	500
3/4	полосы	400
1/2	полосы	300
1/4	полосы	200
1/8	полосы	100
1/16	полосы	50
строчная информация		10

Предложения по размещению рекламы на страницах журнала направлять по адресу: 107023, Москва,

**Электрозаводская ул. 21, «Электрозавод»,
Редакция журнала ЭЛЕКТРО**

**Справки по телефонам:
(495) 152-56-55, (495) 777-82-01,
факс (495) 777-82-11**