

УДК 537.876 + 621.316

PACS: 94.20.ws 93.85.+q 94.20.D-

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-496-502

EDN: JZFUIM



Особенности генерации и распространения низкочастотного электромагнитного излучения промышленными линиями электропередач

А. В. Костров, А. Г. Галка

Рассматриваются особенности излучения электромагнитных волн очень низких частот (ОНЧ) промышленными линиями электропередач, в цепи которых установлены тиристорные регуляторы мощности. Для ОНЧ-излучения такая линия из-за бросков тока с фронтом порядка 10 мкс представляет собой антенну бегущей волны – антенну Бевереджа. Из-за дисперсионных свойств подстилающей поверхности угол излучения относительно горизонта зависит от частоты. Обсуждаются эффекты медленного дрейфа во времени частот, промодулированных 50/60 Гц, которые регистрируются как на спутнике, так и на земле. Предлагается использовать дрейфующие частоты для мониторинга состояния нижней ионосферы.

Ключевые слова: гармоники тока промышленной частоты, антенна Бевереджа, диаграмма направленности, динамический спектр, дрейф частоты.

Введение

Появление гармоник в линиях электропередач (ЛЭП) связано с работой тиристорных регуляторов мощности, которые позволяют изменять подводимую к нагрузке мощность посредством управления задержкой открывания тиристора на полупериоде основной частоты переменного тока [1, 2]. Тиристорные регуляторы мощности с шестидесятых годов применяются во всех отраслях промышленности, где необходимо управлять энергией, выделяемой на активных нагрузках: в сталеплавильных печах, при переработке пластмасс, на железнодорожном транспорте и т. д. Характерная осциллограмма тока в нагрузке при тиристорной коммутации представлена на

рис. 1а. В результате, при работе тиристорного регулятора мощности в цепи питания возникают импульсы тока с частотой следования, кратной промышленной частоте 50/60 Гц. Время открывания тиристора, как правило, не превышает 10 мкс, и соответствующая этому длительность определяет ширину частотного спектра импульса тока в ЛЭП.

Спектрограмма вблизи ЛЭП обычно имеет вид горизонтальных полос, отстоящих друг от друга на 50/60 или 100/120 Гц (рис. 2а). Однако в некоторых местах приема сигналов наблюдается дрейф во времени излучения высоких частот (рис. 2б), промодулированных частотой 100/120 Гц. Такие сигналы регистрируются как наземными приемниками, так и на спутниках. Эти два вида радиоизлучения, источником которого являются магистральные ЛЭП, получили названия PLHR (power line harmonics radiation) (рис. 2а) и MLR (magnetospheric line radiation) (рис. 2б) [3–9]. Авторы многих работ по наблюдениям MLR, считают, что это излучение происходит из магнитосферы Земли, где PLHR взаимодействуют с энергичными электронами, и это приводит к дрейфу частоты во времени [10].

Костров Александр Владимирович, зав. лаб., д.ф.-м.н.
Галка Александр Георгиевич, н.с., к.ф.-м.н.
 E-mail: galasnn@ipfran.ru
 Институт прикладной физики РАН.
 Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Статья поступила в редакцию 27.07.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 27.10.2023

© Костров А. В., Галка А. Г., 2023

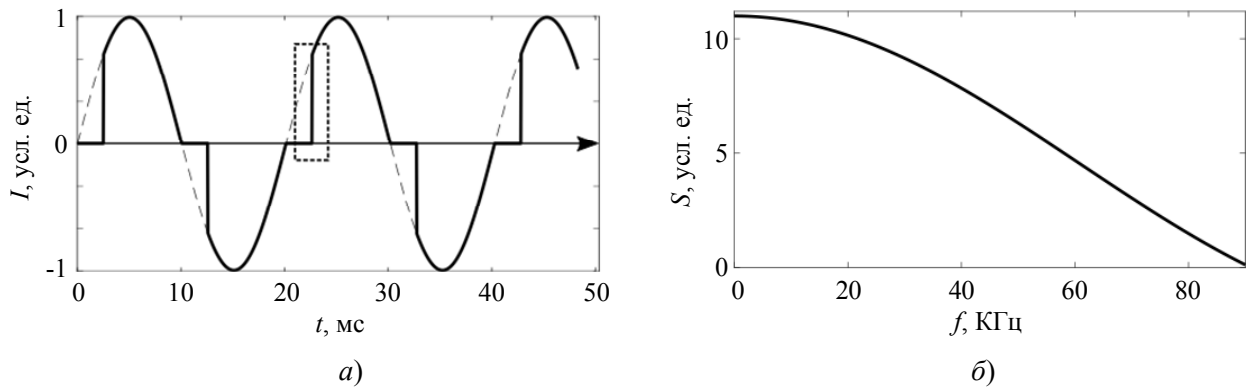


Рис. 1. а) – характерная осциллограмма тока в нагрузке для схемы с тиристорным регулированием мощности; б) – спектр одиночного броска тока

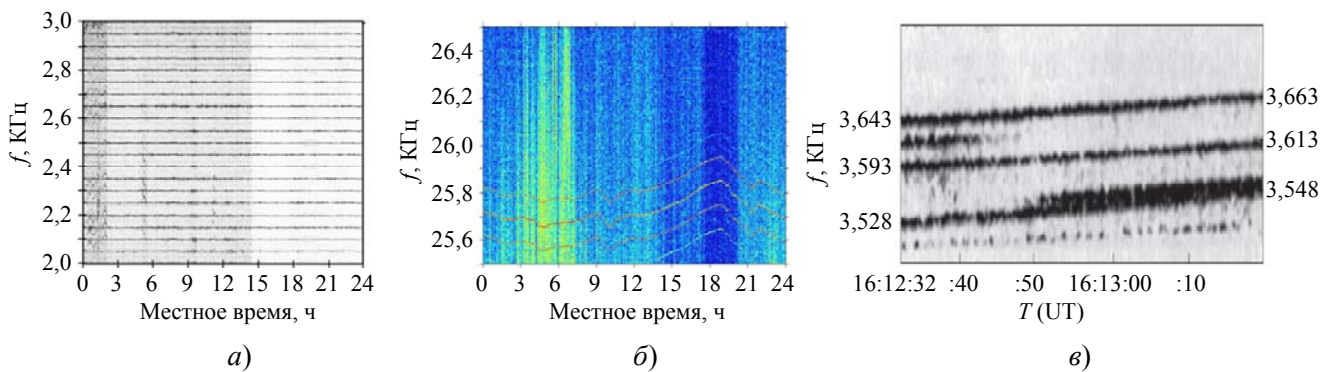


Рис. 2. Виды ОНЧ-излучения, принимаемого в р. п. Васильсурск, Нижегородская область (а, б) и на спутнике ISEE1 [14] (в)

В настоящей работе обсуждаются особенности ОНЧ-излучения промышленными ЛЭП, представляющей собой антенну бегущей волны – антенну Бевереджа.

Антенна Бевереджа

Антенна в виде длинного провода, расположенного на небольшой высоте относительно земли и нагруженная на одном конце на сопротивление R , приблизительно равное волновому сопротивлению линии 200–600 Ом, называется антенной Бевереджа [11, 12]. Она является широкодиапазонной $0,1\lambda < L < 4\lambda$ и обладает остро выраженной направленностью с узким лучом как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Диаграмма направленности зависит от L/λ и сужается при укорочении длины волны. Угол максимума диаграммы направленности по отношению к горизонту может меняться от 0 до 40 градусов в зависимости от частоты излучения, что связано с дисперсией действительной и мнимой

части показателя преломления волны тока в подстилающей поверхности. Это означает, что в различных интервалах ОНЧ возможно возбуждение волн под разными углами к горизонту. Несмотря на потери половины мощности в подстилающей поверхности, такие антенны широко используются радиолюбителями и специалистами для связи в КВ-диапазоне из-за удобства развертывания и узкой диаграммы направленности. Таким образом, мощные линии электропередач при работе тиристорных преобразователей могут являться антенной бегущей волны для частот, возникающих во время броска тока (см. рис. 1) и распространяющихся вдоль линии в виде коротких импульсов. Частота следования этих импульсов для однофазной системы кратна 50/60 Гц или 100/120 Гц.*

* Отметим, что при определенных расстояниях между подстанциями в железнодорожных ЛЭП возможны резонансы на высоких гармониках сети. Это может привести к выходу из строя питающий трансформатор [13].

Основная особенность антенны Бевереджа (излучение и прием электромагнитного поля) связана с тем, что вдоль провода над землей протекает ток, фазовая скорость которого превышает скорость света. Схематично структура волны, распространяющейся между проводом и землей, показана на рис. 3.

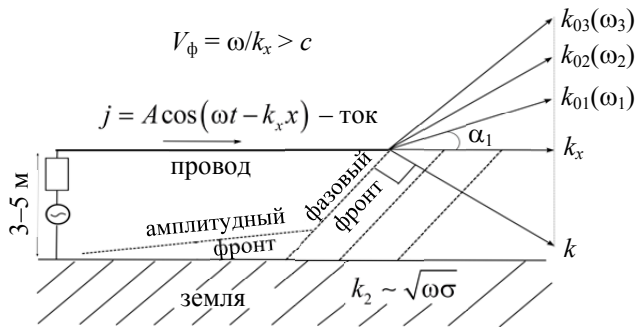


Рис. 3. Схематическая структура электромагнитной волны, распространяющейся между проводом и поверхностью земли. Угол наклона максимума диаграммы направленности зависит от частоты ω излучения

Для частот ОНЧ ток проводимости больше тока смещения, и постоянная распространения зависит от проводимости σ и диэлектрической проницаемости ϵ почвы. Наличие потерь в подстилающей среде приводит к тому, что амплитудный и фазовый фронт волн в линиях не совпадают, т. е. эта волна неоднородная, и в проводе возникает бегущий ток $j = A \cos(\omega t - k_x x)$, фазовая скорость которого больше скорости света. Такой ток излучает электромагнитную волну под углом α : $\cos(\alpha) \sim \sqrt{\sigma / (\omega \epsilon)}$.

При слабой зависимости от σ частоты ω получается, что чем выше частота, тем под большим углом она излучается.

Наблюдательные данные

Регистрация электромагнитного излучения в ОНЧ-диапазоне проводилась на полигоне Васильсурск, Нижегородская область. Для приема излучения в течение суток использовалась электрическая антенна с вертикальной поляризацией. После оконного спектрального Фурье анализа установлено, что одновременно с СДВ-станциями, распространяющимися в волноводе Земля-ионосфера,

регистрируются гармоники промышленных ЛЭП (рис. 2а), которые отстоят друг от друга на 50–100 Гц и спектрограммы представляют собой набор горизонтальных прямых.

Однако на некоторых спектрограммах наблюдался дрейф частоты «гармоник», излучаемых ЛЭП во времени. Типичная спектрограмма представлена на рис. 2б и рис. 4а.

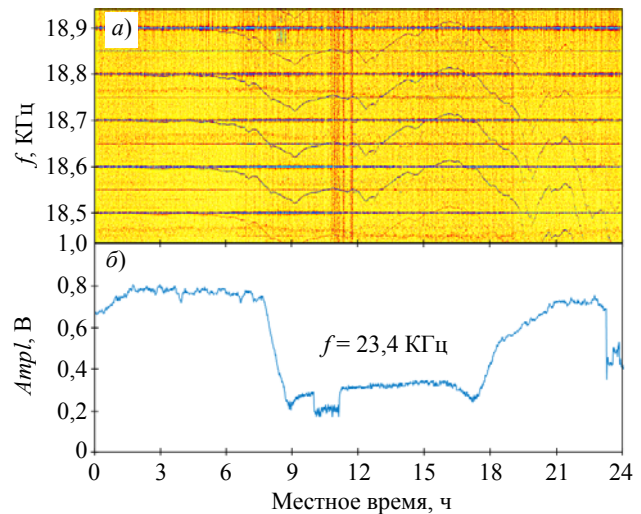


Рис. 4. (а) – дрейф частоты ОНЧ-излучения, принимаемого на земле 30 ноября 2021 г. (б) – суточный ход амплитуды (Ampl) СДВ станции ДНО: частота вещания 23,4 КГц, северо-запад Германии

Ночью частота сигнала уменьшалась и после утреннего прохождения терминатора начинала возрастать до прихода вечернего терминатора и затем опять уменьшалась. На рис. 4б изображен суточный ход амплитуды сигнала станции ДНО, излучающей на частоте 23,4 КГц и расположенной на северо-западе Германии на расстоянии 3000 км от пункта приема. Отчетливо видно изменение амплитуды сигнала во время прохождения над приемным пунктом утреннего и вечернего терминатора.

На рис. 5 представлены спектрограммы ОНЧ-сигналов, принимаемых одновременно на земле и на спутнике «Demeter» [4].

Спутник пролетал область регистрации сигнала за время 60 с на высоте 500 км. Авторы утверждают, что частотный дрейф наблюдался как на спутнике, так и на Земле. Этот факт свидетельствует об одинаковой природе возбуждения волн MPLR. Частотный дрейф ОНЧ-излучения, генерируемого ЛЭП, наблюдался на многих спутниках, и наиболее типичная спектрограмма показана на рис. 2в [14].

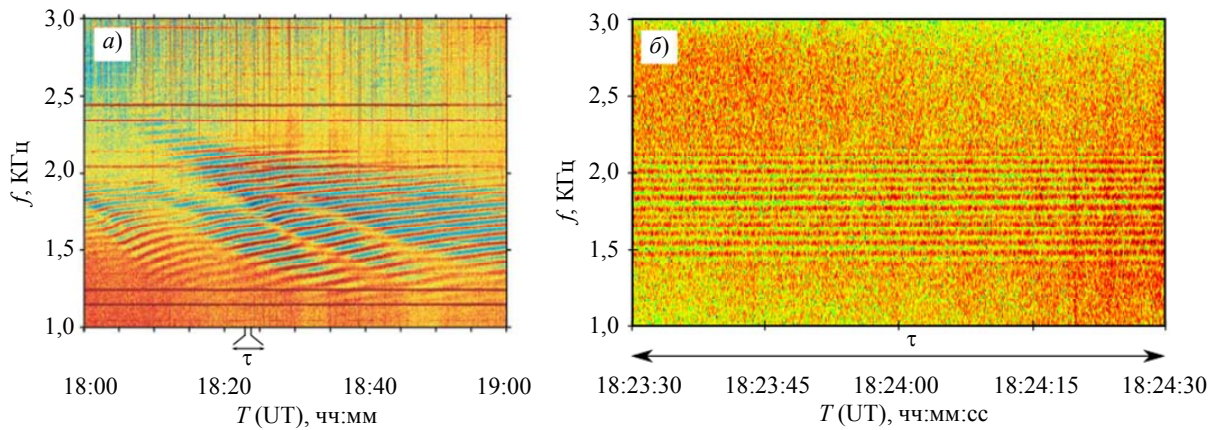


Рис. 5. Спектрограмма сигнала в диапазоне 1–3 кГц, принимаемого на станции Kannuslehto, Финляндия (а) и на спутнике Demeter (б) [10]

По современным представлениям ОНЧ-сигналы распространяются в волноводе, нижней границей которого является поверхность Земли, а верхний – D-слой днем или E-слой ночью. Сложность описания излучения в таком волноводе определяется размытостью и конечностью проводимостью нижней границы ионосферы, ее анизотропными свойствами за счет влияния магнитного поля Земли, конечной проводимостью и сложным рельефом земной поверхности [15]. Регулярные изменения во времени напряженности поля связаны с регулярным изменением состоянием ионосферы – уровнем ее нижней границы и степенью ионизации отражающей области. Как правило, повышение амплитуды поля от дня к ночи объясняется уменьшением поглощения ОНЧ-излучения при пропадании слоя D в ночное время суток. Объяснение наблюдаемого дрейфа частоты ОНЧ-излучения от ЛЭП, принимаемого на земле, связано с движением отражающего слоя нижней ионосферы в течение суток. На рис. 6 показана схема приема частот электромагнитного сигнала, излучаемого ЛЭП.

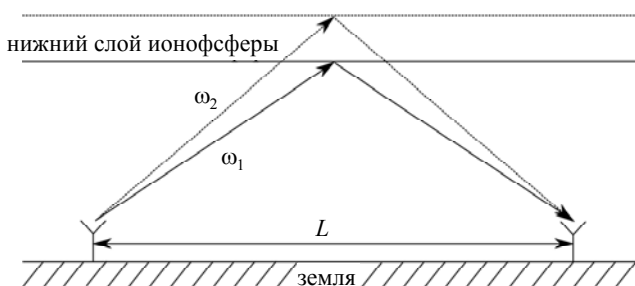


Рис. 6. Схема наземного приема частот электромагнитного сигнала, излучаемого ЛЭП. L – фиксированная база между излучателем и приемником

При наклонном распространении волн под углом θ к горизонту волна по закону преломления в неоднородной среде может отразиться от ионосферы в соответствии с условием $\sin(\theta) = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{1 - \omega_{pe}^2 / \nu^2}$ где ω_{pe} – плазменная частота ионосферы на высоте h и ν – частота столкновений электронов с нейтральными атомами, $\nu \gg \omega$. В течение суток плотность плазмы в нижней ионосфере меняется, и при фиксированной базе L (рис. 6) в приемный пункт приходит сигнал на других частотах. Цуги волн в различных частотных интервалах распространяются как правило с частотой следования 50/100 (60/120) Гц, и, применяя к принимаемому сигналу оконное Фурье преобразование, получим медленный дрейф во времени сигнала, изучаемого ЛЭП и состоящего из полос, определяемых частотой модуляции (рис. 2б).

После прохождения утреннего терминатора изменение сигнала не такое резкое, как от СДВ-станций с частотой 23,4 КГц, т. к. источник излучения находится значительно ближе к пункту приема. В этой точке приема, по нашим оценкам, осуществляется прием сигнала от металлургического завода г. Выкса, находящегося на расстоянии 160 км от места приема. Близость источника излучения к приемному пункту позволяет осуществлять диагностику движения отражающего слоя ионосферы в течение суток.

Таким образом, регистрация ОНЧ-излучения от промышленных предприятий, использующих тиристорные регуляторы мощности, позволяет по частотному дрейфу отслеживать

нижнюю границу ионосферы (D-, E-слои) в течение суток или большего времени и осуществлять диагностику параметров нижней ионосферы.

При наклонном распространении электромагнитных волн одновременно с отражением от области $\sin(\theta) = \sqrt{1 - \omega_{pe}^2 / v^2}$ в соответствии с законом преломления возможно, что часть энергии волны пройдет через неоднородный скин-слой до высот $h > 70$ км, где электроны замагничены, и показатель преломления N становится положительным, а его выражение в свистовом диапазоне частот $\omega_{pe} \gg \omega_{he} \gg \omega$ (ω_{he} – электронная циклотронная частота) имеет вид: $N^2 = \omega_{pe}^2 / (\omega \cdot \omega_{he} \cdot \cos(\theta) - \omega^2)$.

Для регистрации ОНЧ-волн, излучаемых промышленными предприятиями, необходи-

мо, чтобы эти волны распространялись до высот порядка 500 км (орбита спутника) вдоль магнитного поля от точки трансформации. К таким волнам относятся свистовые волны конической рефракции, групповая скорость которых направлена вдоль магнитного поля (рис. 7б). Заметим, что такая трансформация электромагнитных волн в свистовые в соответствии с законами преломления возможна для наклонных волн, распространяющихся под малым углом к горизонту. Волны конической рефракции гидируются магнитным полем и могут при наличии естественных неоднородностей в магнитосфере дойти до магнито-сопряженной точки. Аналогично, свистовые волны, возбуждаемые в ионосфере от молниевых разрядов, трансформируются в электромагнитное излучение, которое распространяется в атмосфере под малым углом к горизонту.

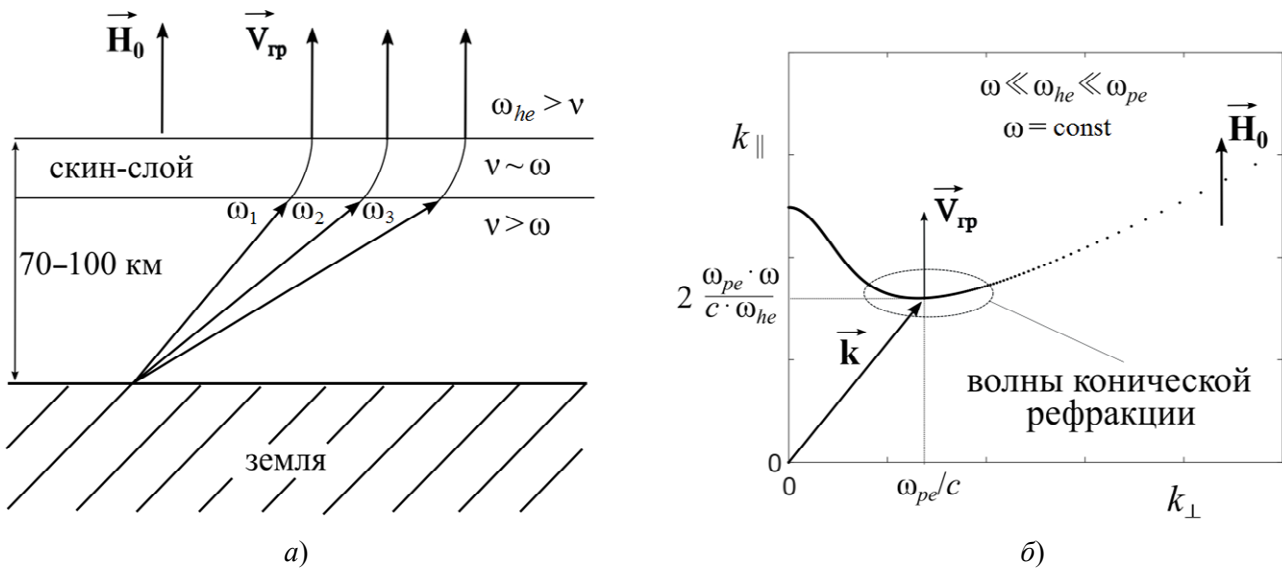


Рис. 7. (а) – трансформация электромагнитного ОНЧ-излучения в свистовые волны. (б) – поверхность волновых векторов свистовых волн в ионосфере, гидируемых магнитным полем Земли

Заключение

1. Линии электропередач, работающие на мощные потребители энергии, где используются тиристорные регуляторы, являются эффективными антеннами бегущей волны для высокочастотной составляющей части импульса тока с длительностью фронта порядка 10 мкс.

2. Высокочастотные волны сверхдлинно-волнового диапазона распространяются в виде

неоднородной волны между проводами ЛЭП и подстилающей поверхностью – землей. Неоднородная волна из-за замедления и поглощения в земле вызывает в проводе бегущий ток, фазовая скорость которого больше скорости света, и излучает электромагнитную волну под углом к горизонту. Важно, что угол излучения электромагнитной волны такой антенны зависит от частоты, что связано с дисперсионными свойствами распространения волны тока в подстилающей поверхности, где действи-

тельная и мнимая части показателя преломления зависят от частоты.

3. Цуги волн в различных частотных интервалах излучаются и распространяются в виде импульсов с частотой модуляции, как правило, 50/100 Гц. В Фурье-спектре сигнала, отраженного от границы нижней ионосферы, при фиксированном расстоянии между излучателем и приемником наблюдается дрейф частот во времени. Дрейф частот связан с изменением состояния ионосферы в течение суток. Обычно дрейф спектральных составляющих не превышает 200 Гц.

4. Часть электромагнитного излучения ЛЭП при отражении от ионосферы может трансформироваться в свистовые волны и регистрироваться на спутнике, т. к. магнитное поле Земли влияет на дисперсионные свойства электронных волн на высоте более 70 км. При наклонном падении возможно возбуждение свистовых волн – волн конической рефракции, групповая скорость которых направлена вдоль магнитного поля. При отражении и прохождении ОНЧ-волн через слой нижней ионосферы из-за влияния внешнего магнитного поля происходит преобразование линейно-поляризованного поля в поле с эллиптической поляризацией. Этот эффект и наблюдается как в приемном пункте так и на спутнике Demeter [12].

Таким образом, дрейф частоты f сигнала во времени t СДВ-диапазона, принимаемого в наземном пункте, связан с вертикальным перемещением нижней границы ионосферы. Локальные экстремумы $f(t)$ могут быть связаны как с солнечной активностью [16], так и с нестационарными потоками заряженной космической пыли [17]. Это явление при соответствующем выборе приемного пункта может стать основой для создания новой системы диагностики нижней ионосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-22-20093).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ариллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Костров А. В., Гуцин М. Е., Стриковский А. В. / Геомagnetизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 4. С. 522. doi: 10.7868/S0016794017030099
3. Helliwell R. A., Katsufrakis J. P., Bell T. F., Raghuram R. / Journal of Geophysical Research. 1975. Vol. 80. № 31. P. 4249. doi:10.1029/JA080I031P04249
4. Nemeč F., Santolik O., Parrot M., Berthelier J. J. / J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. P. A04308. doi: 10.1029/2005JA011480
5. Rodger C. J., Clilverd M. A., Yearby K. H., Smith A. J. / J. Geophys. Res.: Space Physics. 2000. Vol. 105. № A7. P. 15981. doi: 10.1029/1999JA000413
6. Koons H. C., Dazey M. H., Edgar B. C. / Journal of Geophysical Research. 1978. Vol. 83. № A8. P. 3887. doi: 10.1029/ja083ia08p03887
7. Tomizawa I., Yoshino T. / J. Geomagn. Geoelectr. 1985. Vol. 37. № 3. P. 309. doi: 10.5636/jgg.37.309
8. Rodger C. J., Thomson N. R., Dowden R. L. / J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. № A4. P. 5681. doi: 10.1029/94JA02865
9. Parrot M., Nemeč F., Santolik O., Berthelier J. J. / Annales Geophysicae. 2005. Vol. 23. № 10. P. 3301. doi: 10.5194/angeo-23-3301-2005
10. Parrot M., Manninen J., Santolik O., Nemeč F., Turunen T., Raita T., Macusova E. / Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. P. L19102.
11. Марков Г. Т., Петров Б. М., Грудинская Г. П. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Сов. Радио, 1979.
12. Ротхаммель К. Антенны. Т. 1. – Минск: Наш город, 2001.
13. Карякин П. Н. Тяговые сети переменного тока. – М.: Транспорт, 1987.
14. Bell T. F., Lurette J. P., Inan U. S. / J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. № A5. P. 3530. doi: 10.1029/JA087iA05p03530.
15. Макаров Г. И., Новиков В. В., Орлов А. Б. / Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1970. Т. 13. № 3. С. 321.
16. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972.
17. Костров А. В. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 4. С. 327.

Features of VLF radiation of industrial frequencies

A. V. Kostrov and A. G. Galka

Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences
46 Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: galasnn@ipfran.ru

Received 27.07.2023; revised 16.10.2023; accepted 27.10.2023

The features of the emission of electromagnetic waves of an VLF range by industrial power lines, in the circuit of which thyristor power regulators are installed, are considered. For VLF, such a line, due to current surges with a front of about 10 microseconds, is a traveling wave antenna – a Beveredge antenna. Due to the dispersion properties of the underlying surface, the radiation angle relative to the horizon depends on the frequency. The effects of slow drift in time of shift frequencies modulated 50/60 Hz, which are recorded both on the satellite and on the ground, are discussed. It is proposed to use drifting frequencies to monitor the state of the lower ionosphere.

Keywords: harmonics of industrial frequency current, Beveredge antenna, radiation pattern, dynamic spectrum, frequency drift.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-496-502

REFERENCES

1. Arrillaga J., Bradley D. A. and Bodger P. S., Power system harmonics, Moscow, Energoatomizdat, 1990.
2. Kostrov A. V., Gushchin M. E. and Strikovskii A. V., Geomagnetism and Aeronomy **57** (4), 482 (2017). doi: 10.1134/s0016793217030094
3. Helliwell R. A., Katsufakis J. P., Bell T. F. and Raghuram R., Journal of Geophysical Research **80** (31), 4249 (1975). doi: 10.1029/JA080I031P04249
4. Nemeč F., Santolik O., Parrot M. and Berthelier J. J., J. Geophys. Res. **111**, A04308 (2006). doi: 10.1029/2005JA011480
5. Rodger C. J., Clilverd M. A., Yearby K. H. and Smith A. J., J. Geophys. Res.: Space Physics **105** (A7), 15981 (2000). doi: 10.1029/1999JA000413
6. Koons H. C., Dazey M. H. and Edgar B. C., Journal of Geophysical Research **83** (A8), 3887 (1978). doi: 10.1029/ja083ia08p03887
7. Tomizawa I. and Yoshino T., J. Geomagn. Geoelectr. **37** (3), 309 (1985). doi: 10.5636/jgg.37.309
8. Rodger C. J., Thomson N. R. and Dowden R. L., J. Geophys. Res. **100** (A4), 5681 (1995). doi: 10.1029/94JA02865
9. Parrot M., Nemeč F., Santolik O. and Berthelier J. J., Annales Geophysicae **23** (10), 3301 (2005). doi: 10.5194/angeo-23-3301-2005
10. Parrot M., Manninen J., Santolik O., Nemeč F., Turunen T., Raita T. and Macusova E., Geophys. Res. Lett. **34**, L19102 (2007).
11. Markov G. T., Petrov B. M. and Grudinskaya G. P., Electrodynamics and propagation of radio waves, Moscow, Sov. Radio, 1979.
12. Rothammel K., Antennenbuch, vol. 1, Berlin, Deutscher Militärverlag, 1959.
13. Karyakin R. N., Tyagovye seti peremennogo toka (AC Electric Traction Networks), Moscow, Transport, 1987.
14. Bell T. F., Luetze J. P. and Inan U. S., J. Geophys. Res. **87** (A5), 3530 (1982). doi: 10.1029/JA087iA05p03530
15. Makarov G. I., Novikov V. V. and Orlov A. B., Radiophys. Quantum. Electron. **13** (3), 245 (1970). doi: 10.1007/BF01030372
16. Alpert Y. L. Radio Wave Propagation and the Ionosphere: Propagation of Electromagnetic Waves Near the Earth vol. 2, Plenum Publishing Corporation, 1974.
17. Kostrov A. V., Plasma Physics Reports **46** (4), 443 (2020). doi: 10.1134/S1063780X20040066