

А.В. Костров

Генерация и излучение высоких гармоник рабочих частот промышленных линий электропередач в магнитосферу Земли **K. Bullough, T.R. Kaiser, H.J. Strangeways (***1985***),** Unintentional manmade modification effects in the magnetosphere, *J. Atmos. Terr. Phys., 47, 1211-1223* Установлено, что излучение на гармониках 50/60 Гц состоит из отдельных импульсов.

- J. Manninen Some aspects of ELF-VLF emissions in geophysical research, Academic Dissertation, Sodankylä Geophysical Observatory Publications, Oulu 2005
- R.A. Helliwell, J.P. Katsufrakis, T.F. Bell and R. Raghuram (1975), VLF line radiation in the earth's magnetosphere and its association with power system radiation, J. Geophys. Res. 80, 4249-4258
- C.G. Park, R.A. Helliwell (1978), Magnetospheric effects of power line radiation, Science, 200, 727-730
- C.G. Park, R.A. Helliwell (1981), Power line radiation in the magnetosphere, Adv. Space Res., 1, 423-437
- K.H. Yarby, A.J. Smith, K. Bullough (1983), Power line harmonic radiation in Newfoundland, J. Atmos. Terr. Phys., 45, 409-419

Свойства излучения на гармониках рабочих частот линий электропередач

PLHR:	MLR:
 Линии точно кратны промышленной частоте 50 / 60 / 100 / 120 Гц Нет дрейфа частоты 	 Линии отстоят друг от друга на 50 / 60 / 100 / 120 Гц Обычно присутствует дрейф частоты Как правило, амплитудно-частотно модулированы
Porojärvi 25/01/1993 Total power (H) A,3 4,2 4,2 4,1 4,0 4,0 07.30 07.45 07.00	Porojärvi 17/11/1993 Total power (H) $1,8$ -5 dB 1,7 -5 dB 1,6 $-15-253,514.09$ 14.11 $14.13Time (UT)$



Что является источником гармоник 50/60 Гц?

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

Системы управления потребляемой мощностью

Тиристорные регуляторы мощности позволяют изменять подводимую к нагрузке мощность путём задержки включения тиристора на полупериоде переменного тока



Антенна Бевереджа

 $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$



ЛЭП как антенна бегущей волны



Диапазон частот *f* ~ 2-8 кГц (λ ~ 20 – 150 км) попадает в условия оптимального излучения. В качестве источника излучения Килогерцового диапазона могут выступать мощные промышленные потребители электроэнергии.

10.02.2010



Особенности спектрального анализа

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

Регистрация спектра:

многоканальные аналоговые устройства с полосовыми фильтрами, настроенными на разные частоты

с цифровой обработкой сигнала: оконное преобразование Фурье, вейвлет-анализ

Частотно-модулированный сигнал:

$$A = A_0 \cos \Phi_0 t + m \sin \Omega t$$

где *m* – индекс модуляции и Ω – частота модуляции.



Временная зависимость мгновенной частоты ЧМ сигнала

10.02.2010

Спектрограммы ЧМ сигналов

Если частота модуляции Ω больше, чем частотное разрешение Δω спектрографа, или, другими словами, если период модуляции меньше временного разрешения, то спектрограмма будет состоять из горизонтальных полос: Если временное разрешение спектрографа ∆t меньше периода модуляции T, а постоянная времени накопления не превышает период модуляции, то спектрограмма будет воспроизводить зависимость мгновенной частоты от времени:



Спектрограммы ЧМ сигналов

При использовании аналогового многоканального спектрографа временное разрешение δt может оказаться меньше периода модуляции частоты T, но при этом постоянная времени сравнима с периодом модуляции T, либо заметно его превышает. В этом случае спектрограмма будет "размыта" вдоль временной оси.





Параметрический механизм преобразования частоты

10.02.2010

Параметрическое преобразование частоты в плазме с нестационарным магнитным полем

Принципиальная схема экспериментов по параметрическому преобразованию частоты в плазме с нестационарным магнитным полем, проводимых на стенде «Крот»



10.02.2010

Уравнение переноса частоты в среде с нестационарными параметрами (ВКБ приближение):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{V}_{\mathbf{g}} \nabla \omega = -\omega \left(\frac{\partial n\omega}{\partial \omega} \right)^{-1} \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\omega,\mathbf{k}}$$

Дисперсионное соотношение для волн свистового диапазона:

$$n^{2} = \frac{k^{2}c^{2}}{\omega^{2}} = 1 + \frac{\omega_{p}^{2}}{\omega \omega_{H} \cos \Theta - \omega}$$

Уравнение переноса частоты свистовой волны:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \left| \mathbf{V}_{\mathbf{g}} \right| \frac{\partial \omega}{\partial s} = \frac{\omega}{\omega_{H}} \frac{\partial \omega_{H}}{\partial t}$$

$$\omega >> \frac{1}{\tau} \sim \frac{\left|\partial \omega_{H} / \partial t\right|}{\omega_{H}}$$

Результаты лабораторного эксперимента на стенде «Крот»

Преобразование частоты электромагнитного излучения свистового диапазона частот, распространяющегося в плазме с нестационарными возмущениями магнитного поля



Осциллограммы возмущений магнитного поля и спектрограммы пробных волн, принимаемых из плазмы; величина возмущений магнитного поля δB/B~10-30%

10.02.2010



спектров излучения на гармониках 50/60 Гц

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

Схема расположения финских приемных станций



На карте показано расположение КНЧ-ОНЧ приемной станции в Пороярви, передатчика Зевс, геофизической обсерватории в Соданкюле и несколько финских городов

Расшифровка спектрограммы

Спектрограмма сигнала, принимаемого в Пороярви во время работы станции «Зевс»



J. Manninen Some aspects of ELF-VLF emissions in geophysical research, Academic Dissertation, Sodankyla Geophysical Observatory Publications, Oulu 2005

10.02.2010

Тонкая структура спектра линейчатого магнитосферного излучения (MLR)

Две группы магнитосферных линий:

а) линии с медленно уменьшающейся частотой (MRL); между линиями 100 Гц б) линии с постоянными частотами, кратными 50 Гц (PLHR)



J. Manninen Some aspects of ELF-VLF emissions in geophysical research, Academic Dissertation, Sodankyla Geophysical Observatory Publications, Oulu 2005

10.02.2010

Расшифровка спектрограммы



ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

«Триггерное» излучение

Излучение с растущей во времени частотой между парой выделяющихся линий гармоник промышленной частоты 2950/3050 Гц. Период повторения 4 секунды.



J. Manninen Some aspects of ELF-VLF emissions in geophysical research, Academic Dissertation, *Sodankyla Geophysical Observatory Publications, Oulu 2005*

10.02.2010

Расшифровка спектрограммы

Нестабильность в цепях управления



Полосовой фильтр, обусловленный коэффициентом возбуждения волн и их пространственной сепарацией





Спектрограмма гармоник промышленных линий электропередач регистрируемая на спутнике



M. Parrot, Observations of power line harmonic radiations by the low-altitude AUREOL-3 satellite, *J. Geophys. Res., vol. 99, no. A3, pp. 3961-3966, 1994*

10.02.2010

Расшифровка спектрограммы



Вероятно, дрейф средней частоты излучения обусловлен сепарацией различных гармоник 50/60 Гц по разным силовым линиям и движением самого спутника. Наклон линий гармоник 50/60 Гц может быть связан с параметрическим механизмом преобразования частоты.

Расшифровка спектрограммы



Спектрограмма того же сигнала, но при окне анализа равном 10 с. При детальном рассмотрении спектра можно выделить тонкую структуру в виде отдельных линий, отстоящих друг от друга на расстоянии 5-6 Гц

Заключение

- ▶ Показано, что тиристорные управители мощности, которые используются на крупных промышленных предприятиях, могут быть источником коротких (t≤10⁻⁵ сек) периодических импульсов тока, протекающих по промышленным линиям электропередач. Ширина спектра таких импульсов тока может достигать 100 кГц. Как правило, частота повторения импульсов 100/120 Гц.
- Установлено, что промышленная линия электропередач для высоких гармоник 50/60 Гц может быть достаточно эффективной антенной бегущей волны. Направление максимума диаграммы направленности относительно горизонта зависит от частоты излучения. Таким образом, происходит пространственная сепарация возбуждаемых в ионосфере свистовых волн с разными частотами (Δf ~ 1÷10 кГц) по различным силовым линиям магнитного поля.
- Эффективность излучения высоких гармоник промышленных линий электропередач может изменяться (максимум в 2 раза) при изменении нагрузки этой линии. Подобные временные вариации могут происходить в выходные дни.

Заключение

- Показано, что построение спектрограмм излучения высоких гармоник промышленных линий электропередач требует специального выбора частотно-временного разрешения. Если постоянная времени анализа больше периода повторения импульсов излучения, то спектрограмма имеет линейчатую структуру с интервалом между линиями равным частоте следования импульсов.
- На основании теоретических представлений и лабораторного эксперимента установлено, что при распространении высоких гармоник промышленной частоты в магнитосфере Земли из-за возмущения показателя преломления плазмы более низкочастотными волнами возможен дрейф частоты во времени. При этом расстояние по частоте между гармониками не изменяется. Таким образом показано, что природа генерации магнитосферных линий радиоизлучения и излучения гармоник промышленной частоты одна и та же, только одни волны прошли через нестационарную плазму, другие распространялись в спокойных условиях.