

УДК 621.31

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ RLC ЦЕПЬ СИСТЕМЫ «КОРА ЗЕМЛИ – АТМОСФЕРА – ИОНОСФЕРА» И ЕЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА

А.Д. Подольцев, докт.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: podol@ied.org.ua

Предложена глобальная электрическая RLC цепь планеты Земля, моделирующая взаимосвязанные электромагнитные процессы на сверхнизких частотах в коре Земли, атмосфере и ионосфере. Для ее компьютерной реализации, учитывающей сферическую пространственную структуру элементов цепи, использовался пакет программ Matlab/Simulink. На основании проведенных исследований показано наличие в этой цепи резонансов в области частот 0,8–4 Гц, причем первая резонансная частота составляет 0,83 Гц. Изучена реакция этой RLC цепи на внешнее воздействие (гармоническое, ступенчатое, импульсное) и показано возникновение значительных локальных перенапряжений на ее элементах при внешнем гармоническом воздействии на резонансной частоте. Библ. 8, рис. 7, табл. 1.

Ключевые слова: глобальная атмосферная электрическая цепь, геомагнитно-индуцированные токи, резонанс, локальные перенапряжения, электроэнергетическая система.

В настоящее время для изучения электрических процессов, происходящих в атмосфере планеты Земля, используется концепция глобальной атмосферной электрической цепи [3,4,9]. Согласно этой концепции кора Земли представляется как нижняя электропроводящая обкладка гигантского конденсатора, а ионосфера – его верхняя электропроводящая обкладка (рис. 1, а). Данная модель, дополненная резистивными элементами и внутренними источниками тока или напряжения (например, [8]), позволяет исследовать глобальные медленно протекающие (с эквивалентной частотой менее 0,1 Гц) процессы электрического заряда и разряда этого конденсатора за счет различных физических процессов в атмосфере Земли, приводящих к возникновению атмосферного электричества.

Существует другой класс явлений, связанных с протеканием электромагнитных волновых процессов вблизи поверхности Земли. Для этого класса характерно выполнение условия $\lambda \leq R_E$, где λ – длина волны электромагнитного поля, а $R_E = 6371$ км – средний радиус Земли, что соответствует частотному диапазону сигналов $f \geq 0,1c/R_E = 4,7$ Гц, где c – скорость света в вакууме. При исследовании таких процессов применяется волновая теория электромагнитного поля (например, [1,6,10]). В рамках такого подхода было показано существование резонансных частот Шумана, равных 7,8 Гц, 14 Гц, 20 Гц [10].

При протекании в атмосфере Земли электромагнитных процессов в области сверхнизких частот 10^{-3} –1 Гц возможен колебательный обмен между энергией электрического поля, локализованного в атмосфере Земли, и магнитного поля, связанного с протеканием электрических токов в проводящих слоях коры Земли и ионосферы. Для анализа таких процессов, возникающих, например, в результате действия различных природных или созданных человеком факторов, следует рассматривать эквивалентную электрическую цепь с сосредоточенными RLC параметрами, схематически показанную на рис. 1, б. Хотя такие процессы в силу сверхнизкой частоты не являются волновыми, однако при их протекании также могут возникать колебательные процессы, связанные с периодическим обменом энергией между реактивными L и C элементами системы, а отсюда и резонансные явления, приводящие к возникновению локальных перенапряжений как в атмосфере, так и в коре Земли. Такие явления могут негативно сказываться на работе различных технических систем, таких, например, как электроэнергетические системы передачи электроэнергии на большие расстояния. Так, в последнее время исследователями многих стран активно изучаются негативные последствия от действия геомагнитно-индуцированных токов на электроэнергетические системы и системы связи [2,8,11].

Целью настоящей работы является:

1) разработка и компьютерная реализация глобальной трехмерной (учитывающей сферическую пространственную структуру основных элементов) электрической RLC цепи, моделирующей электромагнитные процессы в системе «кора Земли – атмосфера – ионосфера», 2) исследование резонансных свойств этой цепи как глобальной колебательной системы и 3) анализ возникающих в ней

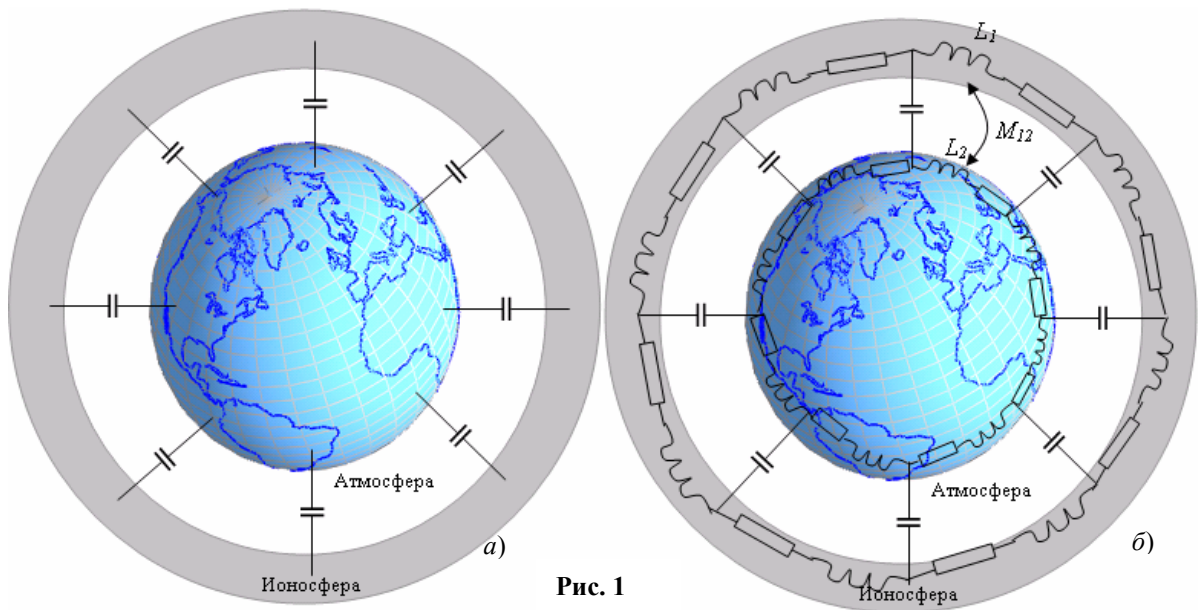


Рис. 1

локальных перенапряжений в зависимости от характера внешнего воздействия применительно к решению задач обеспечения надежной работы электроэнергетической системы в условиях внешних глобальных электромагнитных воздействий, и, в частности, геомагнитно-индуцированных токов.

Описание трехмерной RLC цепи системы «кора Земли – атмосфера – ионосфера».

Для анализа колебательных сверхнизкочастотных процессов будем использовать упрощенную трехслойную модель Земли, схематически показанную на рис. 1, б). Рассматриваемая модель состоит из двух электропроводящих слоев – коры Земли и ионосферы, разделенных диэлектрическим промежутком – атмосферой, характеризующейся слабопроводящими свойствами. Для построения трехмерной, учитывающей сферическую пространственную структуру указанных слоев, модели системы на основе теории электрических цепей с сосредоточенными параметрами представим поверхность Земли в виде эквивалентного додекаэдра (рис. 2, а), состоящего из 12-и правильных пятиугольников со стороной $a = 0,78R_E$ (это значение определяется из условия равенства площади поверхности Земли и додекаэдра). В центре каждого пятиугольника выберем узел и пронумеруем все эти узлы

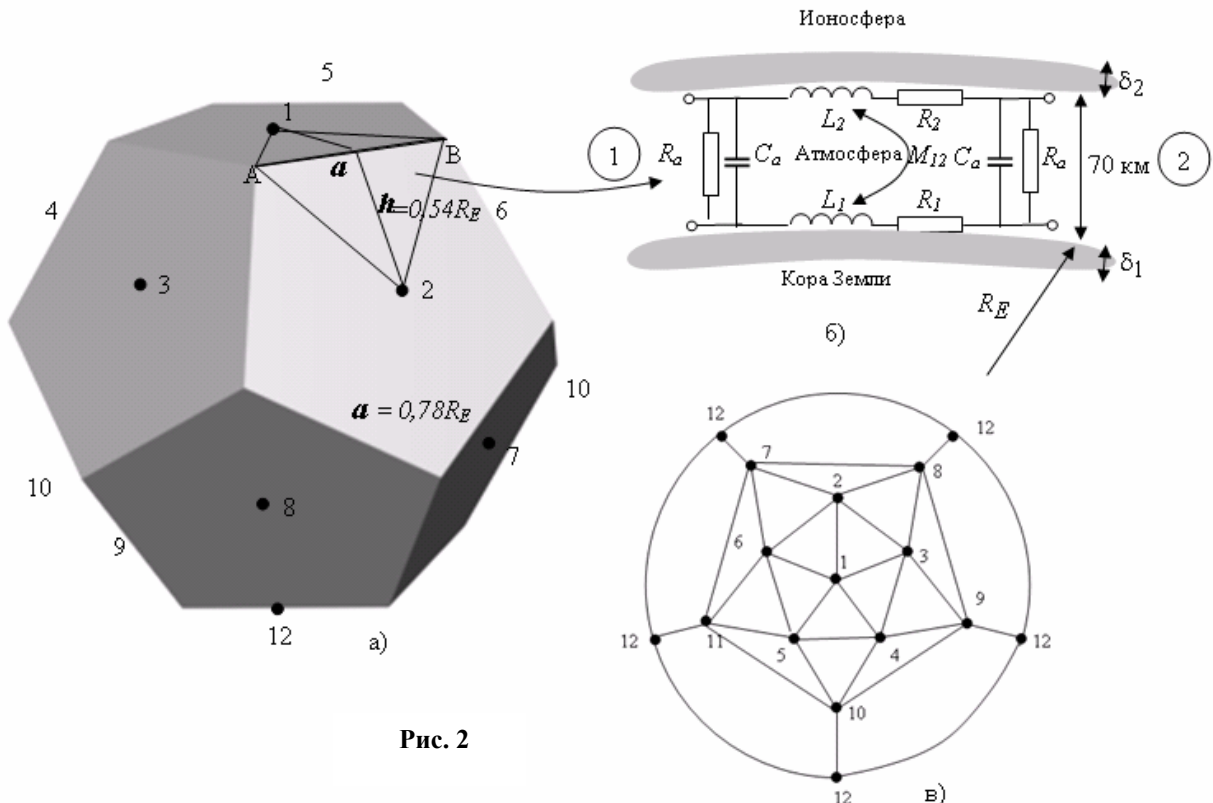


Рис. 2

Величина	Значение
Геометрические размеры	
Толщина слоя коры Земли δ_1	0,25 км
Толщина слоя атмосферы	70 км
Толщина слоя ионосферы δ_2	50 км
Удельная электропроводность среды	
Коры Земли	4 См/м
Атмосфера	$10^{-14} \div 10^{-10}$ См/м
Ионосферы	10^{-4} См/м
Электрические параметры базового элемента	
R_1	0,554 Ом
L_1	3,016 Гн
R_2	$2,77 \cdot 10^{-3}$ Ом
L_2	3,043 Гн
M_{12}	2,27 Гн
R_a	$81,9 \div 81,9 \cdot 10^4$ Ом
C_a	$1,88 \cdot 10^{-3}$ Ф

так, как показано на рис. 2, а. Для построения эквивалентной электрической цепи рассмотрим элементарную ячейку 1AB2, для которой может быть построен базовый элемент электрической цепи, показанный на рис. 2, б. В нем элементы L_1, R_1 и L_2, R_2 моделируют процессы в коре Земли и ионосфере соответственно. Между этими индуктивностями существует взаимная индуктивность M_{12} . Элементы R_a, C_a отражают процессы в атмосфере. Эквивалентная электрическая цепь всей исследуемой системы может быть получена путем соединения с помощью базового элемента всех соседних узлов додекаэдра – граф такого соединения показан на рис. 2, в.

Значения используемых геометрических размеров и рассчитанные значения электрических параметров приведены в таблице. Здесь в качестве эквивалентной толщины слоя коры Земли и ионосферы выбиралась толщина скин-слоя, вычисляемая для частоты 1 Гц согласно следующему выражению: $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu_0\mu_r\sigma)}$, где

величина относительной магнитной проницаемости принималась равной $\mu_r = 1$ для всех слоев, а величина электропроводности приведена в таблице. Отметим, что выбор указанного значения частоты, близкого к первой резонансной частоте системы, будет обоснован далее. Кроме того, величина частоты в большей степени влияет на активные сопротивления R_1, R_2 , а их значение слабо сказывается на значениях резонансных частот.

Известно, что величина электропроводности атмосферы существенно изменяется в зависимо-

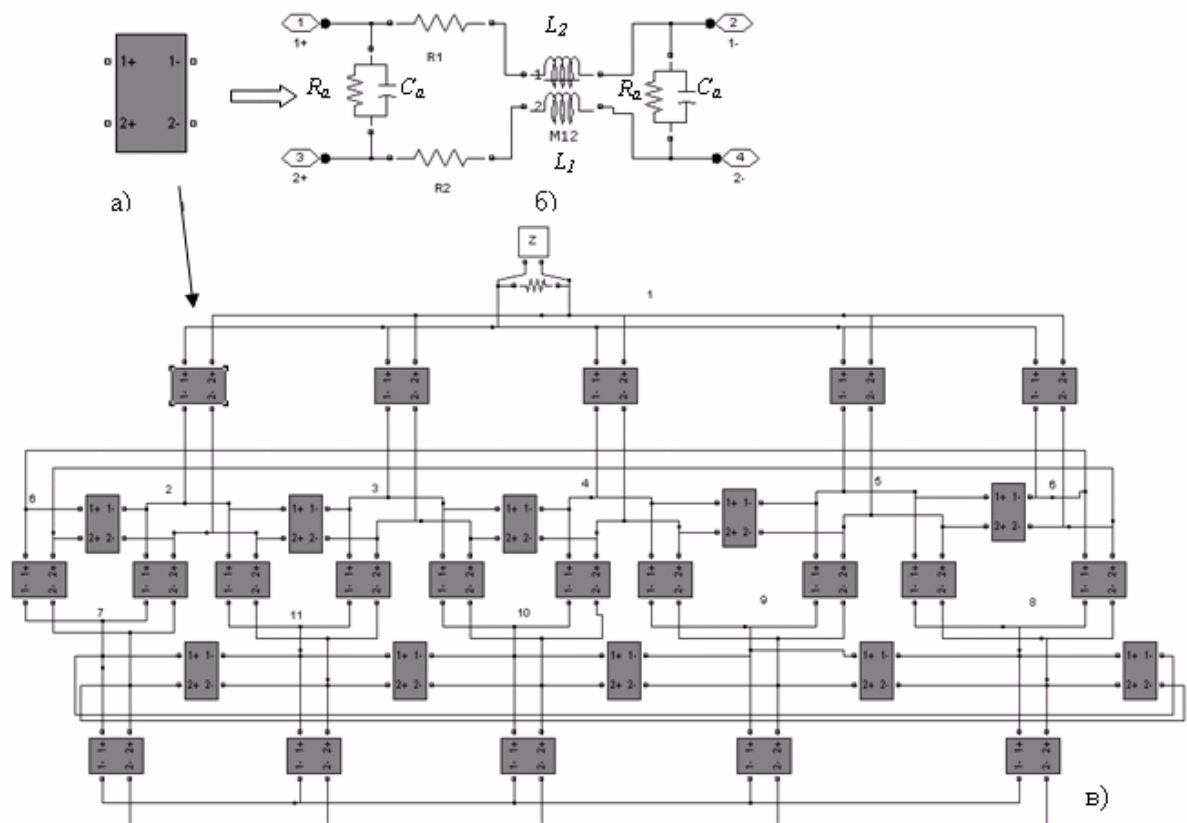


Рис. 3

сти от высоты над поверхностью Земли. Так, согласно графической зависимости, приведенной, например, в [10], электропроводность на поверхности Земли равна 10^{-14} См/м, а на высоте 70 км – 10^{-10} См/м. Для учета этого обстоятельства при расчетах величина электропроводности атмосферы заменялась средней величиной, значение которой варьировалось в указанных в таблице пределах. Для компьютерной реализации описанной глобальной RLC цепи использовался пакет программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems. Разработанная средствами этого пакета модель базового элемента в виде блока показана на рис. 3, а, его схема замещения – на рис. 3, б, а модель всей цепи – на рис. 3, в. Далее приведены результаты исследований, полученные на основе этой модели.

Амплитудно-частотные характеристики входного импеданса глобальной RLC цепи. Для исследования основных электромагнитных свойств разработанной модели, включая и наличие собственных резонансов, измерялась частотная характеристика входного импеданса при рассмотрении в качестве входа точек, расположенных на поверхности Земли и в ионосфере в узле 1 (рис. 2, а), который далее будем условно называть северным полюсом. Для измерения частотной зависимости импеданса между этими точками в схеме на рис. 3, в к этим точкам подключен виртуальный импедансметр. Полученные амплитудно- и фазо-частотные характеристики входного импеданса модели для четырех различных значений электропроводности атмосферы показаны на рис. 4. Из приведенных результатов можно заключить следующее.

В области частот 0,8–4 Гц в исследуемой колебательной системе существуют резонансы, причем, на частотах 0,83, 2,6 и 3,47 Гц имеет место последовательный резонанс (характеризуется локальными минимальными значениями входного импеданса), а на частотах 2,21, 3,26 и 3,59 – параллель-

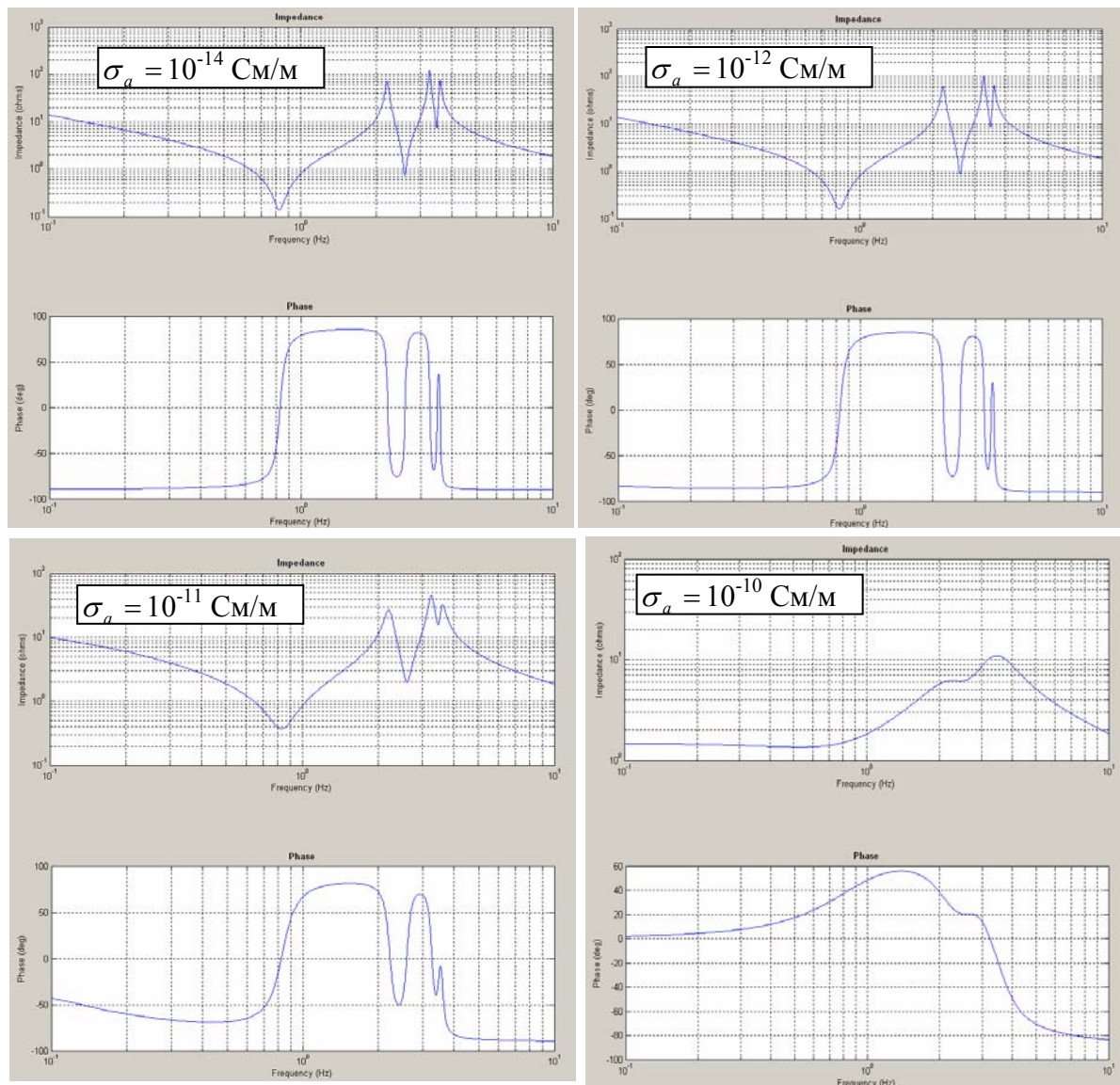


Рис. 4

ный резонанс (характеризуется локальными максимальными значениями входного импеданса). При этом, первая частота последовательного резонанса составляет 0,83 Гц.

Резонансные свойства системы существенно зависят от протекающих в ней диссипативных процессов, которые моделируются продольными и поперечными резисторами в схеме базового элемента на рис. 3, б. Так, с ростом расчетной величины электропроводности атмосферы, который приводит к уменьшению величины включенного параллельно емкости резистора R_a , в силу возрастания диссипативных процессов в атмосфере резонансные свойства системы проявляются в меньшей степени и при достижении критического значения электропроводности 10^{-10} См/м исследуемая система практически утрачивает резонансные свойства. Такая чувствительность амплитудно- и фазочастотных характеристик входного импеданса к свойствам атмосферы может потенциально использоваться для диагностики и мониторинга различных процессов планетарного масштаба, влияющих на электропроводящие свойства атмосферы, например, таких как извержение вулкана, глобальные изменения климата на планете и др. Следует отметить, что для реализации этой концепции необходимо решить задачу экспериментального измерения на практике резонансных электромагнитных свойств планеты в области указанных сверхнизких частот.

Исследование реакции глобальной RLC цепи на различные виды внешнего воздействия.

Рассмотренные выше резонансные свойства глобальной RLC цепи позволяют предположить, что данная колебательная система будет по-разному реагировать на внешнее воздействие. Так, например, из курса электротехники известно, что при внешнем гармоническом воздействии на резонансных частотах отклик системы, характеризующейся высокой добротностью, может значительно превышать по амплитуде внешнее входное воздействие, вызывая при этом локальные перенапряжения, зависящие в общем от пространственного расположения этого элемента в цепи. В то же время, при внешнем воздействии на частотах, отличных от резонансных, отклик системы может быть незначительным, т.е. происходит подавление внешнего сигнала. Для количественного анализа реакции данной колебательной системы далее рассматриваются результаты расчетов выходного напряжения при различных видах внешнего воздействия на входе.

Реакция RLC цепи на внешнее гармоническое воздействие. Предположим, что внешнее гармоническое воздействие в виде гармонического источника напряжения $u = U_{ex} \sin(2\pi ft)$ приложено в узле 1 на рис. 2, а (северный полюс) между точками, расположенными на поверхности Земли и ионосферы, – вход исследуемой системы. В качестве выходного напряжения будем рассматривать напряжение на емкости C_a (между поверхностью Земли и ионосферой) в узле 12 (южный полюс) и напряжение на емкости C_a в узле 2, что соответствует приблизительно уровню 15° северной широты. Результаты расчетов относительного значения выходного напряжения в этих двух выходных узлах в виде функций частоты и при различных значениях электропроводности атмосферы приведены на рис. 5. Из этого рисунка видно следующее.

На частотах последовательного резонанса реакция исследуемой системы на внешнее воздействие значительно превышает само воздействие. Причем, наибольший отклик системы наблюдается на первой резонансной частоте 0,83 Гц и составляет $U_{вых} / U_{ex} = 16,5$ при значении электропроводности атмосферы 10^{-14} См/м (рис. 5, а). Это обстоятельство после его экспериментального подтверждения может быть основанием для разработки Международных норм и правил, ограничивающих генерирование электромагнитных сигналов, частота которых близка к одной из резонансных частот планеты и в силу этого создающих значительные по величине помехи.

С ростом электропроводности атмосферы, т.е. с ростом диссипативных процессов в рассматриваемой колебательной системе, реакция этой системы уменьшается и при электропроводности, превышающей 10^{-10} См/м, реактивные LC элементы слабо влияют на электромагнитные процессы в цепи.

Наибольшая реакция системы наблюдается на противоположном – южном полюсе (в узле 12) при воздействии входного сигнала на северном полюсе (узел 1). Реакция системы на уровне 15° северной широты составляет 11,6 или $11,6/16,5=0,7$ от реакции на противоположном полюсе, что является следствием сферической пространственной структуры исследуемой модели.

Приведенные результаты соответствуют установившемуся гармоническому процессу, при этом характерное время установления процесса при подаче внешнего гармонического воздействия заданной частоты составляет около 30 с (при электропроводности атмосферы 10^{-12} См/м). Это важно учитывать при разработке методики экспериментального измерения частотной характеристики исследуемой системы.

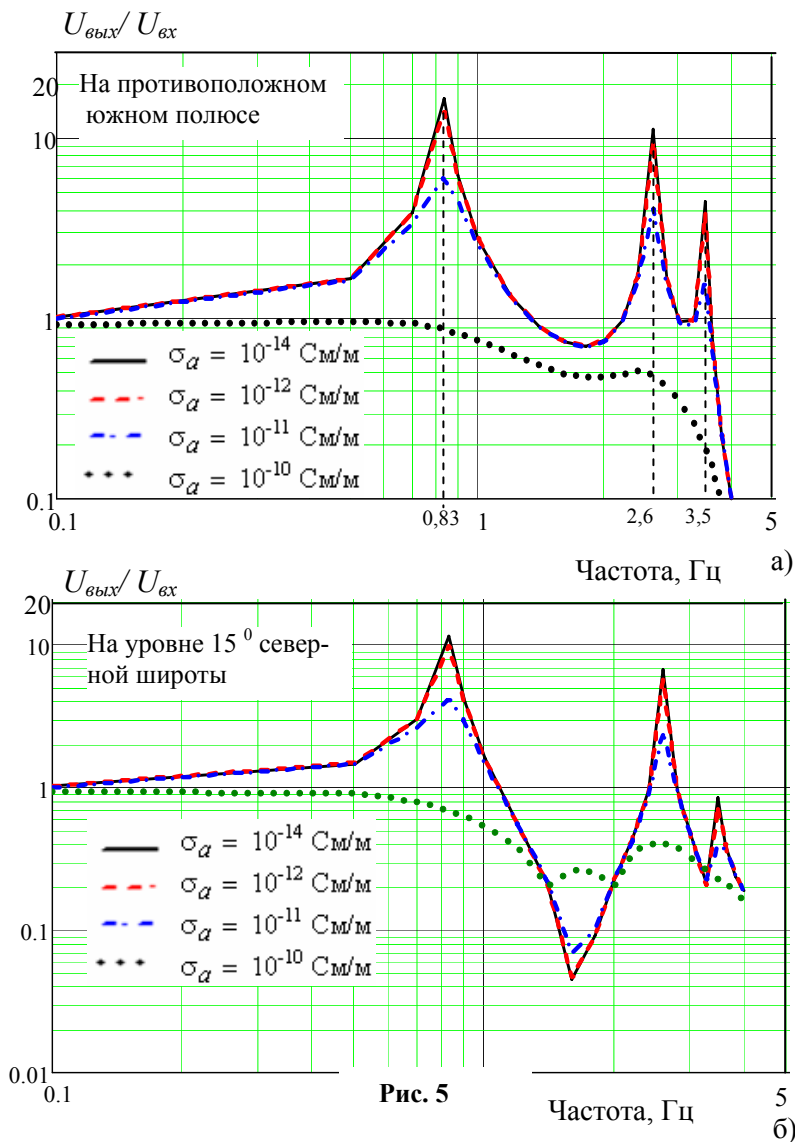


Рис. 5

в котором длительность импульса τ варьировалась в диапазоне 0,1–5 с. Точки входа и выхода выбирались такими же, как и при использовании ступенчатой функции. Зависимость относительного амплитудного значения выходного сигнала в функции от длительности импульса τ показана на рис. 7. Здесь же на вставке показано изменение во времени выходного сигнала при длительности $\tau = 0,7$ с. Как видно из этого рисунка, наибольшая реакция системы реализуется при оптимальной длительности импульса, равной 0,75 с, и составляет $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = 2,5$. Из сравнения приведенных результатов расчетов для различных видов внешнего воздействия можно заключить, что наибольшей является реакция системы на внешнее гармоническое воздействие с резонансной частотой, которая на порядок превосходит по амплитуде реакцию системы при воздействии в виде единичной ступенчатой функции или импульсной функции с оптимальной длительностью импульса.

Реакция RLC цепи на воздействие в виде ступенчатой единичной функции. Реакция системы, измеренная на южном полюсе на элементе C_a , при внешнем воздействии, приложенном на северном полюсе к элементу C_a в виде источника напряжения ступенчатой во времени функции Хевисайда, показана на рис. 6. Здесь величина электропроводности атмосферы принималась равной 10^{-12} Cм/м. Как видно из этого рисунка, выходное напряжение достигает максимального значения $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = 2,75$ за время около 0,6 с и затем затухает в течение приблизительно 30 с, достигая установившегося значения, близкого к единице.

Реакция системы на воздействие в виде импульсной функции. В качестве тестового импульсного сигнала для входного напряжения использовалась функция полуволны синусоиды, описываемая следующим выражением:

$$u(t) = \begin{cases} U_{\text{вх}} \sin(\pi t / \tau), & t < \tau, \\ 0, & t \geq \tau, \end{cases}$$

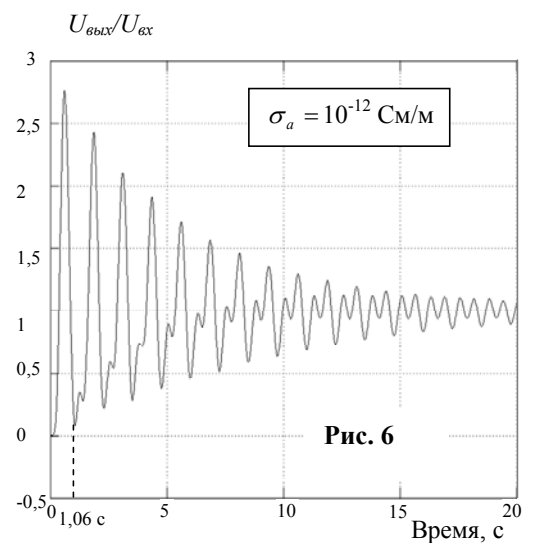
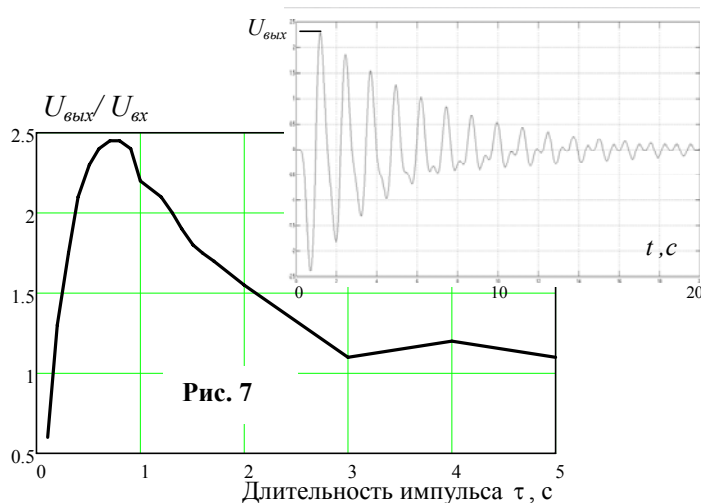


Рис. 6



Заключение.

1. В работе предложена глобальная электрическая RLC цепь планеты Земля, отражающая взаимосвязанные электромагнитные процессы на сверхнизких частотах $10^{-3} \div 1$ Гц в коре Земли, атмосфере и ионосфере. Для ее компьютерной реализации использовался пакет программ Matlab/Simulink.

2. Путем исследования амплитудно- и фазо-частотных характеристик входного импеданса этой RLC цепи показано наличие резонансов в области частот 0,8–4 Гц, причем, первая резонансная частота составляет 0,83 Гц. Ис-

следовано влияние на эти характеристики расчетного значения удельной электропроводности атмосферы, изменяющегося в интервале $\sigma_a = 10^{-14} - 10^{-10}$ См/м, из которого следует, что при $\sigma_a \geq 10^{-10}$ См/м в силу значительных диссипативных процессов в цепи, влияние реактивных LC элементов относительно мало и в цепи не проявляются резонансные свойства.

3. Изучена реакция предложенной RLC цепи на различное внешнее воздействие (гармоническое, ступенчатое, импульсное) и показано возникновение значительных локальных перенапряжений на элементах цепи при внешнем гармоническом воздействии на резонансных частотах. Показана зависимость этих перенапряжений от пространственного расположения этих элементов в системе. Это обстоятельство после его экспериментального подтверждения может быть основанием для разработки Международных норм и правил, ограничивающих генерирование электромагнитных сигналов, частота которых близка к одной из резонансных частот планеты.

4. Предложенная глобальная RLC цепь может быть использована для проведения фундаментальных исследований электромагнитных свойств атмосферы и ионосферы Земли в области сверхнизких частот и анализа полученных при этом экспериментальных данных.

1. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. Кн. 2. – М.: Мир, 1984. – 822 с.
2. Кириленко А.В., Кирик В.В., Подольцев А.Д. Геомагнитные индуцированные токи в электрических сетях // Энергетика та Електрифікація. – 2012. – № 11/12. – С. 46 – 49.
3. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. – Харьков: НТМТ, 2010. – 292 с.
4. Смирнов Б.М. Электрический цикл в земной атмосфере // Успехи физических наук. – 2014. – № 11. – Т. 184. – С. 1153–1176.
5. Хаякава М., Коровкин Н.В. Сейсмоэлектромагнитные явления как новая область исследований радиоволновых явлений // Доклад на XII Международном электротехническом конгрессе ВЭЛК-2011. <http://www.ruscable.ru/>
6. Frieman E.A., Kroll N.M. Lithospheric Propagation for undersea Communication. – Tech. Report (JASON) JSR-73-5, Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., 1973. – 23 p.
7. Hayakawa M. Observation of ULF (Ultra-Low-Frequency) Electromagnetic Emission Associated with Earthquakes // RAST- 2005 Proceedings. – 2005. – Vol. 1. – Pp.776–781.
8. Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – No 62. – Pp. 1563–1576.
9. Rycroft M.J. Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: an overview // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2006. – Vol. 68. – Pp. 445–456.
10. Soriano A.S., Navarro E.A., Paul D.L. Finite Difference Time Domain Simulation of the Earth-Ionosphere Resonant Cavity: Schumann Resonances // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2005. – Vol. 53. – No 4. – Pp.1535 – 1541.
11. Thomson A.W.P., McKay A.J., Viljanen A. Review of Progress in Modelling of Induced Geoelectric and Geomagnetic Fields with Special Regard to Induced Currents // Acta Geophysica. – 2009. – No 1. – Vol. 57. – Pp. 209–219.

**ГЛОБАЛЬНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ RLC КОЛО СИСТЕМИ «КОРА ЗЕМЛІ – АТМОСФЕРА – ІОНОСФЕРА»
ТА ЙОГО РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ**

О.Д. Подольцев, докт.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

e-mail: podol@ied.org.ua

Запропоновано глобальне електричне RLC коло планети Земля для моделювання взаємопов'язаних електромагнітних процесів на наднизьких частотах у корі Землі, атмосфері та іоносфері. Для комп'ютерної реалізації цього кола із врахуванням сферичної просторової структури його елементів використовується пакет програм Matlab/Simulink. На основі проведених досліджень показано існування резонансів в області частоти 0,8–4 Гц, причому перша резонансна частота дорівнює 0,81 Гц. Досліджено реакцію такого RLC кола на зовнішній вплив гармонійного, одиночного та імпульсного джерел напруги і показано виникнення значних локальних перенапруг на його елементах при зовнішньому гармонійному впливі на резонансній частоті. Бібл. 8, рис. 7, табл. 1.

Ключові слова: глобальне атмосферне електричне коло, геомагнітно-індуковані струми, резонанс, локальні перенапруження, електроенергетична система.

**GLOBAL ELECTRIC RLC –CIRCUIT OF A SYSTEM "THE EARTH'S CRUST – ATMOSPHERE – IONOSPHERE"
AND ITS RESONANCE PROPERTIES**

A. Podoltsev

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

e-mail: podol@ied.org.ua

The global electric RLC-circuit of the Earth is proposed to simulate the coupled electromagnetic processes of extremely low frequency in the Earth's crust, atmosphere and ionosphere. For its computer implementation, taking into account the spatial structure of the spherical elements of the system, the software Matlab/Simulink is used. As shown by study, the circuit is characterized by resonances within frequency range of 0,8–4 Hz, and the first resonance frequency is equal 0,81 Hz. The response of this RLC-circuit to external action harmonic, step function and pulsed voltage sources is examined and significant local overvoltage of the circuit elements under external harmonic action at resonance frequency is revealed. References 8, figures 7, table 1.

Keywords: global atmospheric electric circuit, geomagnetic induced currents, resonance, local overvoltage, power system.

1. King P., Smit G. Antennas in material mediums. – Moskva: Mir, 1984. – 822 p. (Rus)
2. Kyrylenko A.V., Kyrik V.V., Podoltsev A.D. Geomagnetic induced currents in power systems // Enerhetyka ta Elektryfikatsiia. – 2012. – No 11/12. – Pp. 46–49. (Rus)
3. Kravchenko V.I. Lightning. – Kharkov: NTMT, 2010. – 292 p. (Rus)
4. Smirnov B.M. Electrical period in the Earth's atmosphere // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. – 2014. – Vol. 184. – No 11. – Pp. 1153–1176. (Rus)
5. Hayakawa M., Korovkin N.V. Seismo-Electromagnetic phenomena // XII International Electrotechnical congress VELK-2011. Available at: <http://www.ruscable.ru/> (accessed 09.12.2015) (Rus)
6. Frieman E.A., Kroll N.M. Lithospheric Propagation for undersea Communication. – Tech. Report (JASON) JSR-73-5, Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., 1973. – 23 p.
7. Hayakawa M. Observation of ULF (Ultra-Low-Frequency) Electromagnetic Emission Associated with Earthquakes // RAST- 2005 Proceedings. – 2005. – Pp.776–781.
8. Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 62. – 2000. – Pp. 1563–1576.
9. Rycroft M.J. Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: an overview // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 68. – 2006. – Pp. 445–456.
10. Soriano A.S., Navarro E.A., Paul D.L. Finite Difference Time Domain Simulation of the Earth-Ionosphere Resonant Cavity: Schumann Resonances // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – Vol. 53. – No 4. – 2005. – Pp. 1535–1541.
11. Thomson A.W.P., McKay A.J., Viljanen A. Review of Progress in Modelling of Induced Geoelectric and Geomagnetic Fields with Special Regard to Induced Currents // Acta Geophysica. – Vol. 57. – No 1. – 2009. – Pp. 209–219.

Надійшла 02.12.2015

Остаточний варіант 18.12.2015