

УДК 621.372.061

М.Н. Горбачев

Институт электродинамики НАН Украины, Киев

## ТРЕХМЕРНОЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И УСТРОЙСТВАХ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В данной статье приведен пример решения задачи трехмерного математического моделирования периодических энергетических негармонических процессов в радиотехнической цепи (устройстве) с переменным параметром при воздействии входных негармонических детерминированных сигналов. Для нахождения трехмерных моделей этих процессов в виде режимных траекторий использован новый метод геометрического моделирования.

**Ключевые слова:** радиотехнические цепи и устройства, переменные параметры, детерминированные негармонические сигналы, энергетические периодические негармонические процессы, трехмерные геометрические модели, режимные траектории.

### Введение

В настоящее время в области радиопередатчиков (например, радиовещательных передатчиков с усилителями класса Д) и в области источников вторичного электропитания (ИВЭП) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) широко применяются ключевые методы усиления колебаний, когда активные приборы (транзисторы, электронные лампы и др.) работают в режиме переключений [1]. Это связано с тем, что ключевые режимы являются наиболее эффективными, так как они позволяют повысить КПД и улучшить другие технико-экономические показатели РЭА [1]. Однако в ключевых режимах напряжения и токи в радиотехнических цепях являются негармоническими, что значительно усложняет и затрудняет анализ и расчет этих режимов на этапе разработки и проектирования указанной РЭА. Применяемые для этих целей известные традиционные одномерные математические модели (например, в виде активной, реактивной и искажающей составляющих полной мощности [2]) являются не эффективными, так как они отражают лишь отдельные стороны и свойства периодического энергетического негармонического (ПЭН) процесса [1 – 4]. Поэтому одномерные математические модели ПЭН процессов не могут заменить обобщенную трехмерную математическую модель, которая является адекватной ПЭН процессу как физически единому целому [4]. Именно поэтому для решения указанных задач эффективного математического моделирования ПЭН процессов в радиотехнических цепях и устройствах, а также в ИВЭП РЭА, где используются ключевые режимы, целесообразно применять новый метод – метод трехмерного геометрического моделирования, разработанный в работе [4].

### Основное содержание работы

Суть рассматриваемых задач и методика их решения показаны на примере линейной радиотехнической цепи RL с переменной добротностью  $q$ , находящейся под воздействием негармонических сигналов в виде разнополярного напряжения симметричной прямоугольной формы  $u(\Omega t)$ , называемого меандром. Смысл решаемой модельной задачи заключается в следующем. Требуется осуществить трехмерное математическое (геометрическое) моделирование периодических энергетических процессов в этой цепи, сделав переход из одномерной области (области времени “ $t$ ”), в которой существует заданный детерминированный сигнал  $u(\Omega t)$  и вызванная им реакция этой цепи в виде тока, в трехмерную пространственную область – евклидово пространство  $E^{(3)}$  (пространство мощностей) на основе разработанного метода геометрического моделирования. С этой целью необходимо определить и исследовать: во-первых, все компоненты полной мощности  $S$  в этой цепи (активную  $P$ , реактивную  $Q$  и мощность искажения  $T$ ) как функции одного и того же переменного параметра – добротности  $q$ ; во-вторых, найти нормированную систему уравнений, определяющих трехмерную пространственную геометрическую модель исследуемого ПЭН процесса в виде режимной траектории, расположенной на поверхности сферы единичного радиуса. При решении поставленной задачи начальную фазу  $\Psi_U$  заданного периодического негармонического сигнала можно считать равной нулю ( $\Psi_U = 0$ ).

Заданному негармоническому сигналу типа меандр в виде напряжения  $u(\Omega t)$  соответствует математическая модель в виде полного ряда Фурье, содержащего бесконечный спектр гармоник [3]:

$$u(\Omega t) = u(x) = \frac{4E}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin[(2n-1) \cdot x]}{2n-1}, \quad (1)$$

где  $x = \Omega t$ ;  $\Omega = \text{const}$  – угловая частота заданного периодического сигнала;  $t$  – текущее время;  $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$  – числа натурального ряда. Математическая модель реакции (отклика) цепи RL в виде тока  $i(x)$  имеет аналогичный вид:

$$i(x) = \frac{4E}{\pi R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin[(2n-1) \cdot x + \phi_n]}{(2n-1) \cdot \sqrt{1+q^2 \cdot (2n-1)^2}}, \quad (2)$$

где  $q = \Omega L / R$  – добротность цепи при частоте  $\Omega = \text{const}$ ;  $\phi_n > 0$  – угол сдвига фаз между одноименными гармониками сигнала  $u(x)$  и реакции цепи в виде тока  $i(x)$ , имеющими порядок « $n$ ». Для рассматриваемой цепи RL с учетом известных тригонометрических тождеств найдены соотношения:

$$\cos \phi_n = \cos(\arctg \phi_n) = \frac{1}{\sqrt{1+q^2 \cdot (2n-1)^2}}, \quad (3)$$

$$\sin \phi_n = \sin(\arctg \phi_n) = \frac{q \cdot (2n-1)}{\sqrt{1+q^2 \cdot (2n-1)^2}}. \quad (4)$$

Точные значения модулей векторов P, Q, S и T на входе любой линейной цепи как двухполюсника с негармоническим напряжением и током определяются с учетом полного спектра гармоник согласно теории радиотехнических и электрических цепей:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \cos \phi_k; \quad (5)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin \phi_k; \quad (6)$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{\left( \sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \right) \cdot \left( \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2 \right)}; \quad (7)$$

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}, \quad (8)$$

где P – активная составляющая; Q – реактивная составляющая; T – мощность искажения; U и I – действующие (среднеквадратичные) значения соответственно напряжения и тока, определяемые с помощью равенства А.М. Ляпунова. На основе формул (5) – (8) с учетом формул (1) – (4) найдены соотношения:

$$S = \left( 2\sqrt{2}/\pi \right) \cdot \left( E^2/R \right) \times \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} 1 / \left[ (2n-1)^2 \cdot \left[ 1 + q^2 \cdot (2n-1)^2 \right] \right]}, \quad (9)$$

$$P = C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 \cdot \left[ 1 + q^2 \cdot (2n-1)^2 \right]}; \quad (10)$$

$$Q = C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q}{(2n-1)^2 \cdot \left[ 1 + q^2 \cdot (2n-1)^2 \right]}, \quad (11)$$

где

$$C = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{E^2}{R} = \text{const}. \quad (12)$$

Таким образом, полученные формулы (9) – (12) с учетом теории [2 – 4] позволяют в общем виде записать аналитические выражения для расчета нормированных координат вектора полной мощности  $\vec{S}$ , необходимые для построения искомой трехмерной геометрической модели ПЭН процессов:

$$x = \frac{P}{S} = C_1 \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 \cdot \left[ 1 + q^2 \cdot (2n-1)^2 \right]}}; \quad (13)$$

$$y = \frac{Q}{S} = C_1 \cdot \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{q}{(2n-1) \cdot \left[ 1 + q^2 \cdot (2n-1)^2 \right]}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 \cdot \left[ 1 + q^2 \cdot (2n-1)^2 \right]}}}; \quad (14)$$

$$z = \frac{T}{S} = \sqrt{1 - x^2 - y^2} = \sqrt{1 - \frac{P^2}{S^2} - \frac{Q^2}{S^2}}, \quad (15)$$

где  $C_1 = 2\sqrt{2} / \pi = \text{const}$  – постоянный коэффициент. При этом нормированная координата «z» определяется с помощью подстановки в формулу (15) значений нормированных координат «x» и «y», рассчитанных по выражениям (13) и (14). Числовые значения нормированных координат «x», «y» и «z», необходимые для построения трехмерной геометрической модели исследуемых ПЭН процессов в виде режимной траектории, найдены численным методом. Рассчитанная режимная траектория построена на сферической оболочке единичного радиуса на основе пакета программ “Mathcad Professional” и показана на рис. 1.

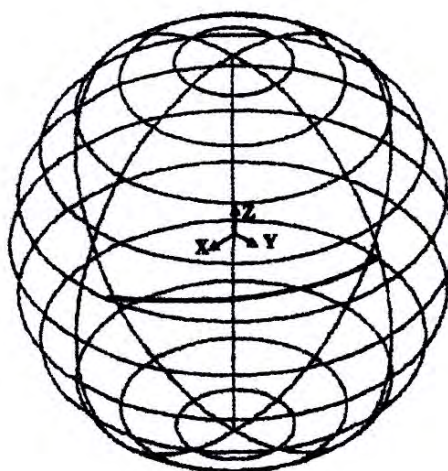


Рис. 1. Режимные траектории для RL цепи с изменяющейся добротностью (изометрия)

Она является сферической неплоской дугой. Кроме того, на рис. 2 приведены графики зависи-

мостей значений указанных нормированных координат как функций переменной добротности  $q$ :

$$x = f_1(q), \quad y = f_2(q) \quad \text{и} \quad z = f_3(q).$$

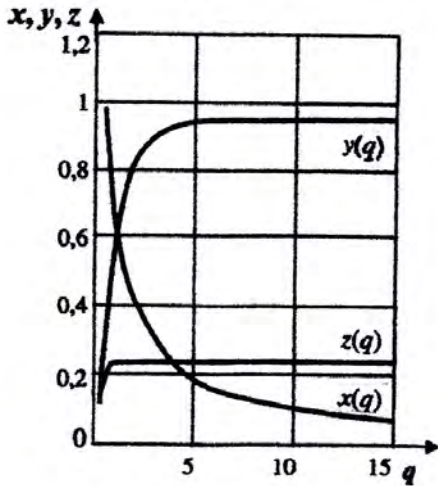


Рис. 2. Графики зависимостей для цепи RL

Аналогично рассмотренной задаче были рассчитаны и построены режимные траектории на сферических оболочках единичного радиуса для RL цепи с переменной добротностью  $q$  ( $1 \leq q < 50$ ) при негармонических испытательных сигналах в виде разнополярных симметричных импульсов напряжения с широтно-импульсной модуляцией [3].

### Заключение

Таким образом, установлено, что физический смысл режимной траектории как трехмерной пространственной кривой состоит в том, что она характеризует (отображает) закон перераспределения между тремя составляющими (P, Q, T) полной мощности S в процессе изменения текущего значения переменного параметра.

### ТРИВИМІРНЕ ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ НЕГАРМОНІЧНИХ ДЕТЕРМІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ В РАДІОТЕХНІЧНИХ КОЛАХ І ПРИСТРОЯХ ІЗ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

М.М. Горбачов

У статті розглянуто приклад вирішення завдання тривимірного математичного моделювання детермінованих (періодичних) енергетичних процесів в радіотехнічному колі (пристрої) зі змінним параметром при дії вхідних імпульсних сигналів. Для знаходження тривимірних моделей цих процесів у вигляді режимних траєкторій використано новий метод геометричного моделювання.

**Ключові слова:** радіотехнічні кола і пристрої, змінні параметри, детерміновані негармонічні сигнали, періодичні енергетичні негармонічні процеси, тривимірні геометричні моделі, режимні траєкторії.

### THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL SIMULATION OF POWER NONHARMONIC DETERMINED PROCESSES IN RADIOTECHNIC CIRCUITS AND RADIO ENGINEERING DEVICES WITH VARIOUS PARAMETERS

M.N. Gorbachev

The example three-dimensional mathematical simulation of determined (periodic) power nonharmonic processes in radio-technic circuit (device) with various parameter and with input impulse signals is discussed in this article. The new method of geometrical simulation of this processes is used for founding three-dimensional models as curves named regime trajectories.

**Keywords:** radiotechnic circuits and radio engineering devices, various parameters, periodic nonharmonic signals, periodic energy nonharmonic processes, three-dimensional geometric models, regime trajectories.

Поэтому любая точка  $M(x, y, z)$  на режимной траектории, нормированные координаты  $x, y, z$  которой являются функциями переменного параметра  $q$  согласно формулам (13) – (15), отображает определенное энергетическое состояние радиотехнического объекта (устройства или цепи).

Теоретические результаты, полученные при исследовании ПЭН процессов в RL цепи с переменной добротностью в рассмотренных задачах на основе трехмерных геометрических моделей (режимных траекторий) использованы при разработке и оптимизации режимов работы усилительных устройств проводного вещания (радиотрансляционных усилителей) серии УПВТ. Это позволило повысить эффективность (КПД) и надежность работы указанных устройств.

### Список литературы

1. Артым А.Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании / А.Д. Артым. – М.: Связь, 1980. – 208 с.
2. Зернов Н.В. Теория радиотехнических цепей / Н.В. Зернов, В.Г. Карпов. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
3. Заездный А.М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи / А.М. Заездный – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 535 с.
4. Горбачев М.Н. Геометрическое моделирование негармонических энергетических процессов в управляемых радиотехнических цепях и системах / М.Н. Горбачев // Наукові праці ОНАЗ імені О.С. Попова – 2004. – № 1. – С. 59-62.

Поступила в редколлегию 21.05.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. А.А. Можаяв, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.