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(Ωt) 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 Т) как функции одного и того же переменного параметра - добротности д; 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 $\Psi_{\rm U}$ 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]:

© М.Н. Горбачев

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

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

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

где $q = \Omega L / R$ — добротность цепи при частоте $\Omega = \text{const}$; $\phi_n > 0$ — угол сдвига фаз между одно-именными 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:

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

где

$$C = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{E^2}{R} = \text{const}$$
 (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:

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

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

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

где $C_1 = 2\sqrt{2} / \pi = {\rm const} - {\rm постоянный}$ 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.

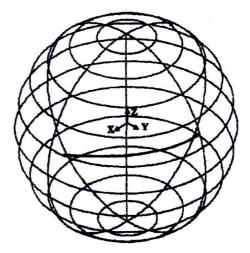


Рис. 1. Режимные траектории для RL цепи с изменяющейся добротностью (изометрия)

Она является сферической неплоской дугой. Кроме того, на рис. 2 приведены графики зависимостей значений указанных нормированных координат как функций переменной добротности q:

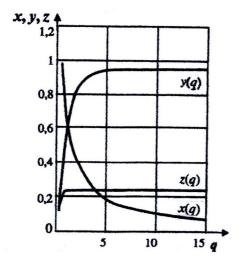


Рис. 2. Графики зависимостей для цепи RL

Аналогично рассмотренной задаче были рассчитаны и построены режимные траектории на сферических оболочках единичного радиуса для RL цепи с переменной добротностью $q (1 \le q < 50)$ 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.

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 Д 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. Можаев, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

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 radiotechnic circuit (device) with various parameter and with input impulse signals is discussioned 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.