

УДК 621.372.061

М.Н. Горбачев

Институт электродинамики НАН Украины, Киев

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И УСТРОЙСТВАХ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Приведен пример решения задачи трехмерного геометрического моделирования и сравнительного анализа периодических энергетических негармонических процессов в радиотехнической цепи (устройстве) с переменной добротностью при воздействии входных негармонических детерминированных сигналов. Для нахождения трехмерных моделей этих процессов в виде режимных траекторий использован новый метод геометрического моделирования. Сравнительный анализ этих процессов выполнен на основе параметров режимных траекторий и нового критерия, разработанного для оценки их эффективности.

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

Введение

В современной радиотехнике с целью повышения КПД широко применяются ключевые методы усиления колебаний в широком диапазоне частот, например, в радиовещательных передатчиках, усилителях класса Д и других радиотехнических устройствах. Особенность ключевых режимов заключается в том, что энергетические периодические процессы в радиотехнических устройствах являются существенно негармоническими. Это значит, что напряжения, токи и составляющие полной мощности в силовых цепях этих устройств содержат бесконечный спектр гармоник, что значительно затрудняет анализ и расчет ключевых энергетических режимов [1 – 3].

Применяемые традиционно известные одномерные математические модели в виде активной P , реактивной Q и искажающей T составляющих полной мощности S для исследования указанных энергетических ключевых режимов являются неэффективными, так как не позволяют исследовать эти процессы как единое целое [4, 5].

В связи с этим был разработан новый метод – метод трехмерного геометрического моделирования указанных энергетических процессов [6, 7]. Этот метод основан на нахождении трехмерной геометрической модели этих процессов как физически единого целого в виде пространственной кривой (режимной траектории), которая расположена на сферической оболочке единичного радиуса. При этом режимная траектория рассчитывается и строится на основе аналитических выражений для нормированных координат x , y , z , указанных составляющих P , Q , T как проекций вектора полной мощ-

ности S в трехмерном евклидовом пространстве $E^{(3)}$.

Основное содержание работы

Для решения задач, которые заключаются в нахождении трехмерных геометрических моделей, и сравнительного анализа периодических энергетических негармонических (ПЭН) процессов как единого целого в указанных радиотехнических цепях и устройствах применен метод геометрического моделирования, разработанный в работах [6, 7].

Сущность решения рассматриваемых задач показана на примере линейной радиотехнической цепи RL с переменной добротностью q , находящейся под воздействием различных негармонических сигналов в виде разнополярных напряжений симметричной прямоугольной формы $u(\Omega t)$ с широтно-импульсной модуляцией [4, 5].

В рассматриваемом примере заданному негармоническому сигналу в виде напряжения $u(\Omega t, \alpha)$ соответствует математическая модель в виде полного ряда Фурье, содержащего бесконечный спектр нечетных гармоник [4, 5]:

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

где $x = \Omega t$; $\Omega = \text{const}$ – круговая частота заданного периодического сигнала; t – текущее время; α – угол модуляции (параметр модуляции); $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ – числа натурального ряда. При этом угол модуляции α может принимать разные фиксированные значения в диапазоне $0 < \alpha < \pi/2$.

Математическая модель реакции (отклика) цепи RL в виде тока $i(x, \alpha)$ имеет следующий вид:

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

где $q = \frac{\Omega L}{R}$ – добротность цепи на частоте $\Omega = \text{const}$; $\varphi_n > 0$ – угол сдвига фаз между одноименными гармониками сигнала $u(x, \alpha)$ и реакции цепи в виде тока $i(x, \alpha)$, имеющими порядок «n». Для рассматриваемой цепи RL с переменной добротностью q найдены соотношения:

$$\varphi_n = \arctg[q \cdot (2n-1)], \quad (3)$$

$$\cos \varphi_n = \cos(\arctg \varphi_n) = \frac{1}{\sqrt{1+q^2} \cdot (2n-1)^2}, \quad (4)$$

$$\sin \varphi_n = \sin(\arctg \varphi_n) = \frac{q \cdot (2n-1)}{\sqrt{1+q^2} \cdot (2n-1)^2}. \quad (5)$$

Как видно из выражений (1) и (2), амплитуды гармоник испытательного негармонического сигнала $u(x, \alpha)$ и соответствующей ему реакции цепи $i(x, \alpha)$ зависят не только от номера гармоники «n», но и от угла или параметра модуляции α . Следовательно, амплитуды гармоник испытательного сигнала U_{nm} и отклика цепи I_{nm} являются функциями номера гармоники «n» и угла модуляции α :

$$U_{nm} = \frac{4E}{\pi} \cdot \frac{\cos[(2n-1) \cdot \alpha]}{2n-1}, \quad (6)$$

$$I_{nm} = \frac{4E}{\pi R} \cdot \frac{\cos[(2n-1) \cdot \alpha]}{(2n-1) \cdot \sqrt{1+q^2} \cdot (2n-1)^2}. \quad (7)$$

На основании выражений (6) и (7) найдены действующие (среднеквадратичные) значения соответственно напряжения U и тока I :

$$U = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot E \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos^2[(2n-1) \cdot \alpha]}{(2n-1)^2}}, \quad (8)$$

$$I = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{E}{R} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos^2[(2n-1) \cdot \alpha]}{(2n-1)^2 [1+q^2] \cdot (2n-1)^2}}, \quad (9)$$

где $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ и $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$.

Точные значения модулей векторов **P**, **Q**, **S** и **T** на входе линейной цепи RL как двухполюсника с негармоническими напряжением и током в общем случае определяются с учетом полного спектра гармоник согласно теории радиотехнических и электрических цепей [4, 5]:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k; \quad (10)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k; \quad (11)$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{\left(\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \right) \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2 \right)}; \quad (12)$$

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}, \quad (13)$$

где P – активная составляющая; Q – реактивная составляющая; T – мощность искажения; S – полная мощность, $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$.

На основе формул (10) – (12) с учетом формул (4) и (5) найдены соотношения:

$$P = C_1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos^2[(2n-1) \cdot \alpha]}{(2n-1)^2 \cdot [1+q^2] \cdot (2n-1)^2}; \quad (14)$$

$$Q = C_1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q \cdot \cos^2[(2n-1) \cdot \alpha]}{(2n-1) \cdot [1+q^2] \cdot (2n-1)^2}; \quad (15)$$

$$S = C_1 \times \sqrt{\left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos^2[(2n-1) \cdot \alpha]}{(2n-1)^2} \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos^2[(2n-1) \cdot \alpha]}{(2n-1)^2 \cdot [1+q^2] \cdot (2n-1)^2} \right]}, \quad (16)$$

где $C_1 = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{E^2}{R} = \text{const}$.

Таким образом, полученные формулы (14) – (16) с учетом формулы (13) позволяют в общем виде записать аналитические выражения для расчета нормированных координат вектора полной мощности \vec{S} , необходимые для построения искомой трехмерной геометрической модели исследуемых ПЭН процессов:

$$x = \frac{P(\alpha, q)}{S(\alpha, q)}; \quad y = \frac{Q(\alpha, q)}{S(\alpha, q)}; \quad z = \frac{T(\alpha, q)}{S(\alpha, q)}. \quad (17)$$

Числовые значения нормированных координат «x», «y» и «z», необходимые для построения трехмерной геометрической модели указанных ПЭН процессов в виде режимной траектории, найдены численным методом как функции добротности q и приведены в табл. 1.

Рассчитанная режимная траектория (кривая 1) для заданного значения угла модуляции $\alpha = \pi/3 = \text{const}$ построена на сферической оболочке единичного радиуса на основе пакета программ «Mathcad Professional» и показана на рис. 1 (изометрия). При этом значения добротности q изменялись в пределах от $q_{\min} = 1,0$ до $q_{\max} = 40$.

Расчет значений нормированных координат $x(q)$, $y(q)$ и $z(q)$ режимной траектории для цепи RL с переменной добротностью q при воздействии знакопеременных широтно-модулированных периодических сигналов в виде напряжения с заданным значением угла модуляции

| Обозначения величин | Расчетные значения нормированных координат $x(q)$, $y(q)$ и $z(q)$ при значении угла модуляции $\alpha = \pi/3$ | | | | | | | | | |
|---------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | q | 0,25 | 0,50 | 1,0 | 2,5 | 5,0 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| $x(q)$ | 0,9176 | 0,7440 | 0,5266 | 0,2857 | 0,1533 | 0,0800 | 0,0533 | 0,0400 | 0,0307 | 0,0272 |
| $y(q)$ | 0,2138 | 0,5354 | 0,7257 | 0,8435 | 0,8733 | 0,8800 | 0,8858 | 0,8864 | 0,8865 | 0,8866 |
| $z(q)$ | 0,3355 | 0,4000 | 0,4544 | 0,4548 | 0,4558 | 0,4600 | 0,4610 | 0,4620 | 0,4621 | 0,4622 |

Аналогично режимной траектории № 1 (кривая № 1) были рассчитаны и построены режимная траектория № 2 (кривая № 2) и режимная траектория 3 № (кривая № 3), построенные на сфере единичного радиуса на рис. 1 в изометрии.

При этом кривая № 2 соответствует входному сигналу в виде напряжения с широтно-импульсной модуляцией при значении угла модуляции $\alpha = \pi/6$, а кривая 3 соответствует входному сигналу типа меандр [4, 5].

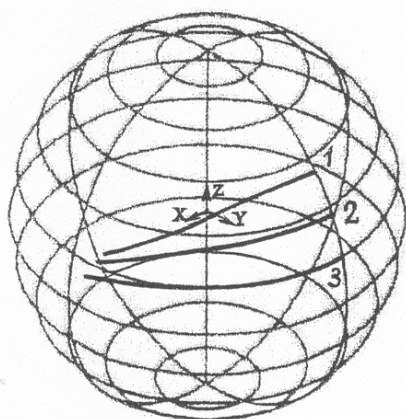


Рис. 1. Режимные траектории для RL цепи с изменяющейся добротностью при воздействии входных негармонических сигналов. Изометрия

Таким образом, на основе найденных трехмерных геометрических моделей (режимных траекторий) адекватных ПЭН процессам как физически единому целому – в RL цепях с переменной (изменяющейся) добротностью при различных входных негармонических сигналах установлено, что:

1) режимные траектории являются сферическими кривыми, имеющими уплощенную часть;

2) геометрическая форма режимных траекторий и их проекций на координатные плоскости существенно зависит от формы входного детерминированного негармонического сигнала и диапазона изменения переменного параметра, например, добротности цепи;

3) основными свойствами режимных траекторий являются: универсальность, информативность, простота, наглядность и компактность;

4) геометрическое отображение указанных ПЭН процессов на сферу единичного радиуса с помощью нормированной системы уравнений обладает свойствами непрерывности и взаимно-однозначного соответствия и, следовательно, является эффективным математическим инструментом для исследования и сравнительного анализа этих процессов как физически единого целого.

Для сравнения и оценки эффективности указанных ПЭН процессов в радиотехнических цепях и устройствах с переменными параметрами автором предложен и разработан новый метод сравнительного анализа ПЭН процессов в указанных радиотехнических цепях и устройствах. Этот метод основан на новом нетрадиционном научном подходе, который заключается в совместном применении:

1) трехмерных геометрических моделей ПЭН процессов как физически единого целого в виде режимных траекторий;

2) оценки эффективности ПЭН процессов на основе параметров режимных траекторий и разработанного критерия эффективности в виде соотношения:

$$K_{\Sigma} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2(1 + z_{\sigma})}, \quad (18)$$

где x_{\max} , x_{\min} – значения нормированных координат, соответствующие началу и концу режимной траектории, z_{σ} – среднее значение нормированной координаты z при заданном диапазоне изменения добротности.

При этом для указанных выше негармонических входных сигналов и заданного диапазона изменения добротности RL цепи в пределах от $q_{\min} = 1,0$ до $q_{\max} = 40$ получены следующие численные значения критерия K_{Σ} :

1) сигналу типа меандр соответствует значение $K_{\Sigma} = 0,2553$;

2) сигналам в виде симметричного разнополярного напряжения с широтно-импульсной модуляцией при разных значениях углов модуляции α соответствуют значения:

$$K_{\Sigma} = 0,2125 \text{ при } \alpha = \pi/6;$$

$$K_{\Sigma} = 0,1882 \text{ при } \alpha = \pi/3.$$

При этом во всех рассмотренных случаях большим значениям критериев K_{Σ} соответствуют более эффективные периодические энергетические негармонические (ПЭН) процессы.

Следовательно, в рассмотренной задаче сопоставления ПЭН процессов в линейной RL цепи с переменной добротностью при воздействии заданных негармонических сигналов двух типов получен новый результат. Он заключается в том, что при одинаковом диапазоне изменения добротности более эффективным является ПЭН процесс, обусловленный сигналами типа меандр, так как ему соответствует большее значение критерия эффективности $K_{\Sigma} = 0,2553$. При этом негармоническим сигналом с широтно-импульсной модуляцией при углах модуляции $\alpha = \pi/6$ и $\alpha = \pi/3$ соответствуют меньшие значения критерия эффективности ($K_{\Sigma} = 0,2125$ и $K_{\Sigma} = 0,1882$).

Заключение

Таким образом, метод геометрического моделирования ПЭН процессов в радиотехнических цепях и устройствах с переменными параметрами позволяет построить трехмерные геометрические модели ПЭН процессов как физически единого целого в виде режимных траекторий. При этом режимные траектории, соответствующие различным входным негармоническим сигналам, расположены на одной и той же сферической оболочке единичного радиуса.

Разработан новый метод сравнительного анализа ПЭН процессов, основанный на использовании параметров режимных траекторий ПЭН процессов совместно с разработанным критерием K_{Σ} для оценки эффективности этих процессов. Этот метод позволяет решать в общей постановке задачи сравнительного анализа указанных ПЭН процессов. Эти задачи имеют большое прикладное значение на этапе расчета и проектирования радиопередающих устройств, например, передатчиков и усилителей проводного вещания [1 – 3].

Список литературы

1. Артым А.Д. Повышение эффективности мощных радиопередающих устройств / А.Д. Артым. – М.: Радио и связь, 1988. – 175 с.
2. Артым А.Д. Усилители класса Д и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании / А.Д. Артым. – М.: Связь, 1980. – 208 с.
3. Кибакин В.М. Основы ключевых методов усиления / В.М. Кибакин. – М.: Энергия, 1980. – 232 с.
4. Горбачев Г.Н. Промышленная электроника / Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
5. Зернов Н.В. Теория радиотехнических цепей / Н.В. Зернов, В.Г. Карпов. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
6. Горбачев М.Н. Геометрическое моделирование негармонических энергетических процессов в управляемых радиотехнических цепях и системах / М.Н. Горбачев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2004. – № 1. – С. 59-62.
7. Горбачев М.Н. Эффективность геометрического моделирования периодических энергетических негармонических процессов в радиотехнических цепях и системах с переменными параметрами / М.Н. Горбачев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова – 2007. – №2. – С. 53-58.

Поступила в редколлегию 25.05.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Можаяев, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ НЕГАРМОНІЧНИХ ДЕТЕРМІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ В РАДІОТЕХНІЧНИХ КОЛАХ І ПРИСТРОЯХ ІЗ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

М.М. Горбачов

Розглянуто приклад вирішення завдання тривимірного геометричного моделювання і порівняльного аналізу енергетичних негармонічних детермінованих (періодичних) процесів в радіотехнічному колі (пристрої) із змінним параметром при дії вхідних негармонічних сигналів. Для вирішення цих завдань використано тривимірні геометричні моделі у вигляді режимних траєкторій та розроблений критерій оцінки ефективності.

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

GEOMETRICAL SIMULATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER PERIODIC NONHARMONIC DETERMINED PROCESSES IN RADIOTECHNIC CIRCUITS AND RADIO ENGINEERING DEVICES WITH VARIOUS PARAMETERS

M.N. Gorbachev

The example geometrical simulation and comparative analysis of determined periodic power processes in radiotechnic circuit (device) with various parameter and with input nonharmonic 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 power processes, three-dimensional geometric models, regime trajectories, comparative analysis.