

**МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ
ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В
РАДИОТЕХНИКЕ¹**

Горбачев М. Н.

Национальный авиационный университет, Киев, Украина

**THE METOD OF GEOMETRICAL SIMULATION OF POWER NONHARMONIC
DETERMINED PROCESSES AND ITS APPLICATION IN RADIOTECHNIC**

Gorbachev M. N.

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Введение

В современной радиотехнике с целью повышения КПД и других технико-экономических показателей все более широко применяются ключевые методы усиления колебаний в широком диапазоне частот, например, это относится к радиовещательным передатчикам, усилителям класса Д, а также к регулируемым источникам вторичного электропитания (ИВЭП) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в которых используются ключевые режимы работы активных элементов (транзисторов, электронных ламп и др.) [1, 2]. При этом эффективность работы радиотехнических устройств в целом и, прежде всего, повышение общего КПД существенно зависит от регулируемых ИВЭП, которые должны иметь высокий собственный КПД, достигаемый тем же самым способом. Например, с этой целью в регулируемых ИВЭП применяют генераторы колебаний прямоугольной формы, а также инверторы с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения [3, 4].

Особенность ключевых режимов заключается в том, что обусловленные ими энергетические детерминированные процессы в радиотехнических цепях и устройствах являются существенно негармоническими. Это значит, что напряжения, токи и составляющие полной мощности в указанных цепях и устройствах содержат бесконечный спектр гармоник, что значительно затрудняет анализ и расчет негармонических энергетических процессов [3-5]. Однако применяемые традиционно известные одномерные математические модели в виде активной P , реактивной Q и искажающей T составляющих полной мощности S для анализа и расчета указанных негармонических (ключевых) энергетических режимов являются неэффе-

¹ Электронный вариант статті: <http://radar.kpi.ua/index.php/radiotechnique/article/view/953>

тивними, так как они характеризуют только отдельные стороны этих режимов [1-5]. Для решения задач эффективного математического моделирования периодических энергетических негармонических (ПЭН) процессов в радиотехнических цепях и устройствах, а также в ИВЭП РЭА, где используются ключевые режимы, в работе предложен новый метод – метод трехмерного геометрического моделирования.

Целью настоящей статьи является изложение сущности разработанного метода трехмерного геометрического моделирования указанных ПЭН процессов и примера его применения в радиотехнике.

Основное содержание работы

Метод трехмерного геометрического моделирования позволяет рассчитать и построить обобщенную трехмерную геометрическую модель, адекватную указанному ПЭН процессу как физически единому целому. Эта геометрическая модель представляет собой режимную траекторию, расположенную на сферической оболочке единичного радиуса в трехмерном евклидовом пространстве $E^{(3)}$. При этом режимная траектория рассчитывается и строится на основе аналитических выражений для нормированных координат x, y, z , соответствующим указанным ортогональным составляющим $\vec{P}, \vec{Q}, \vec{T}$ как проекциям вектора полной мощности \vec{S} в евклидовом пространстве $E^{(3)}$:

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

где S – является модулем вектора полной мощности, а q является переменным физическим параметром радиотехнической цепи или радиотехнического устройства (например, добротностью).

Сущность разработанного метода трехмерного геометрического моделирования ПЭН процессов и суть решаемых на его основе задач в радиотехнике 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 [5-10].

Заданному негармоническому сигналу типа меандр в виде напряжения $u(\Omega t)$ соответствует известная математическая модель в виде полного ряда Фурье, содержащего бесконечный спектр нечетных гармоник [7]:

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

где $x = \Omega t$; $\Omega = const$ – угловая частота заданного периодического сигнала; $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ – 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 $q = \frac{\Omega L}{R}$ – добротность цепи при частоте $\Omega = const$; $\phi_n > 0$ – 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 \vec{P} , \vec{Q} , \vec{S} и \vec{T} на входе любой линейной цепи как двухполюсника с негармоническими 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. На основе формул (5)-(8) с учетом формул (1)-(4) найдены соотношения:

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

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

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

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

Таким образом, полученные формулы (9)-(11) 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:

$$x = \frac{P}{S} = C_1 \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 \cdot [1 + q^2 \cdot (2n-1)^2]}}; \quad (12)$$

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

$$z = \frac{T}{S} = \sqrt{1 - x^2 - y^2} = \sqrt{1 - \frac{P^2}{S^2} - \frac{Q^2}{S^2}}, \quad (14)$$

где $C_1 = 2\sqrt{2} / \pi = const$ – постоянный коэффициент. При этом нормированная координата «z» определяется с помощью подстановки в формулу (14) значений нормированных координат «x» и «y», рассчитанных по выражениям (12) и (13). Числовые значения нормированных координат «x», «y» и «z», необходимые для построения трехмерной геометрической модели исследуемых ПЭН процессов в виде режимной траектории, найдены численным методом и приведены в таблице 1.

Нормированные координаты x , y и z вектора полной мощности \vec{S} , как следует из выражений (12)-(14) с учетом соотношений (5)-(7), (9)-(11) и известного уравнения энергетического баланса (8), удовлетворяют уравнению сферы единичного радиуса (15):

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1. \quad (15)$$

Поэтому трехмерные геометрические модели исследуемых ПЭН про-

цессов в виде режимных траекторий располагаются на сфере (сферической оболочке) единичного радиуса, то есть являются пространственными сферическими кривыми.

Таблица 1

Расчет численных значений нормированных координат « x », « y » и « z »

Пере- мен- ные	Расчетные значения переменных величин								
	q	1,0	2,5	5,0	10	15	20	25	30
$x(q)$		0,6000	0,3570	0,1910	0,0960	0,0650	0,0550	0,0357	0,0330
$y(q)$		0,7714	0,9106	0,9533	0,9672	0,9688	0,9700	0,9710	0,9712
$z(q)$		0,2120	0,2300	0,2340	0,2350	0,2360	0,2360	0,2360	0,2360

Рассчитанная режимная траектория в рассматриваемой задаче построена на сферической оболочке единичного радиуса на основе пакета программ «Mathcad Professional» и показана на рис. 1. В общем случае она является неплоской сферической дугой.

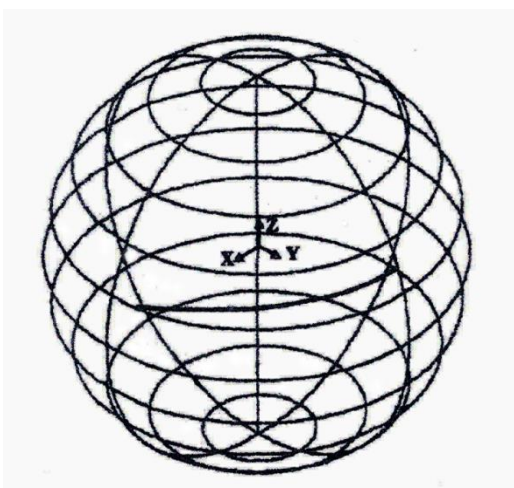


Рис. 1. Режимная траектория для RL цепи с изменяющейся добротностью. Изометрия

Бесконечные функциональные ряды в выражениях (9)-(14) являются сходящимися рядами согласно интегральному признаку сходимости Коши-Маклорена и поэтому их суммы могут быть найдены в замкнутом виде аналитическим способом [10].

Физический смысл режимной траектории как трехмерной пространственной кривой состоит в том, что она отображает закон перераспределения между тремя составляющими (P, Q, T) полной мощности S в процессе изменения текущего значения переменного параметра (добротности q). Это значит, что любая точка $M(x, y, z)$ на режимной траектории, нормированные координаты x, y, z которой являются функциями параметра q согласно формулам (12)-(14), отображает определенное энергетическое состояние радиотехнического объекта (устройства или цепи). Графики зависимостей рассчитанных значений нормированных координат как функций переменной добротности q приведены на рис. 2:

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

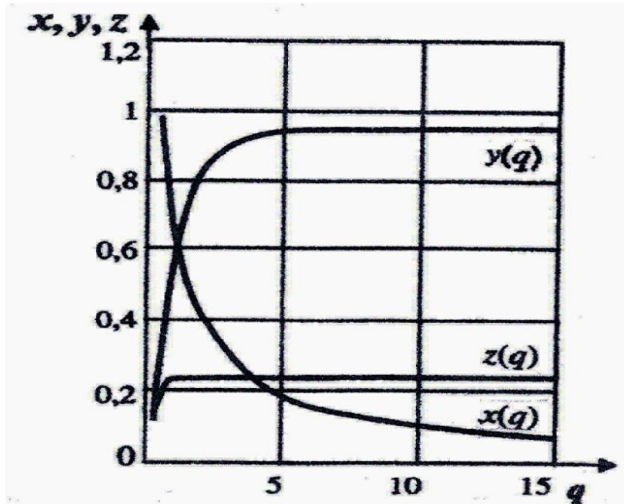


Рис. 2. Графіки залежностей $x = f_1(q)$,
 $y = f_2(q)$ і $z = f_3(q)$ для цепі RL

Теоретические результаты, полученные при исследовании ПЭН процессов в RL цепи с переменной добротностью на основе трехмерных геометрических моделей (режимных траекторий) использованы при разработке и оптимизации режимов работы усилительных устройств проводного вещания (радиотрансляционных усилителей) серии УПВТ (УПВТ-1,5, УПВТ-2 и УПВТ-5). Это позволило повысить эффективность (КПД) и надежность работы указанных устройств, предназначенных для

усиления сигналов звуковой частоты при работе на сеть проводного вещания от различных источников программ (встроенного или резервного УКВ приемника, линии микрофона) и имеют широкий диапазон выходных мощностей (от 100 Вт до 5000 Вт).

Выводы

На основе выполненных в работе исследований получен ряд новых результатов.

1. Предложен новый метод – метод трехмерного геометрического моделирования ПЭН процессов в целом в радиотехнических цепях и устройствах с переменными (изменяющимися) параметрами.

2. На основе нетрадиционного подхода и предложенного метода геометрического моделирования разработан новый подход к математическому моделированию ПЭН процессов в радиотехнических цепях и устройствах, позволяющий решать актуальные задачи в области современной радиотехники и силовой радиоэлектроники.

3. Разработанный метод геометрического моделирования позволяет находить трехмерные модели указанных ПЭН процессов, представляющие собой пространственные кривые в виде режимных траекторий, расположенных на сферических оболочках единичного радиуса в евклидовом пространстве и позволяющих, образно говоря, «увидеть ПЭН процесс глазами его модели».

4. Метод геометрического моделирования на основе нахождения режимных траекторий открывает новые возможности для решения особо актуальных задач сравнительного анализа ПЭН процессов в радиотехнических цепях и устройствах с изменяющимися параметрами.

5. Метод трехмерного геометрического моделирования значительно

расширяет возможности исследователей, разработчиков и проектировщиков радиотехнических устройств, в которых используются ключевые режимы работы активных элементов, так как дополнительно позволяет применить математический аппарат аналитической и дифференциальной геометрии.

Перечень источников

1. Артым А. Д. Усилители класса Д и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании / А. Д. Артым. – М.: Связь, 1980. – 208 с.
2. Артым А. Д. Повышение эффективности мощных радиопередающих устройств / А. Д. Артым. – М.: Радио и связь, 1988. – 175 с.
3. Кондратьев М. В. Усилитель класса Д в качестве регулируемого источника питания / М. В. Кондратьев // Электросвязь. – 1978. – № 1. – С. 68-70.
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. Каганов В. И. Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Каганов, В. К. Битюгов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 542 с.
7. Нефедов В. И. Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Нефедов. – М.: Высшая школа, 2002. – 510 с.
8. Иванов М. Т. Теоретические основы радиотехники / М. Т. Иванов, А. Б. Сергиенко, В. Н. Ушаков. – М.: Высшая школа, 2002. – 306 с.
9. Каплун В. А. Радиотехнические устройства и элементы радиосистем / В. А. Каплун, Ю. А. Браммер, С. П. Лохова, И. В. Шостак. – М.: Высшая школа, 2005. – 294 с.
10. Заездный А. М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи / А. М. Заездный. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 535 с.

References

1. Artym A. D. (1980) *Usiliteli klassa D i klyuchevye generatory v radiosvyazi i radioveshchanii* [D amplifiers and key generators in radio communication and broadcasting]. Moscow, Svyaz' Publ., 208 p.
2. Artym A.D. (1988) *Povyshenie effektivnosti moshchnykh radiopere dayushchikh ustroystv* [Improving the efficiency of powerful radio transmitters]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 175 p.
3. Kondrat'ev M. V. (1978) *Usilitel' klassa D v kachestve reguliruemogo istochnika pitaniya* [D amplifier as a regulated power supply]. *Elektrosvyaz'*, No. 1, pp. 68-70.
4. Gorbachev G. N. and Chaplygin E. E. (1988) *Promyshlennaya elektronika* [Industrial Electronics]. Moscow, Energo-atomizdat Publ., 320 p.
5. Zernov N. V. and Karpov V. G. (1972) *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepei* [Theory of radio engineering circuits]. Leningrad, Energiya Publ., 816 p.
6. Kaganov V. I. and Bityugov V. K. (2006) *Osnovy radioelektroniki i svyazi* [Basics of electronics and communications]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 542 p.
7. Nefedov V. I. (2002) *Osnovy radioelektroniki i svyazi* [Basics of electronics and communications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 510 p.
8. Ivanov M. T., Sergienko A. B. and Ushakov V. N. (2002) *Teoreticheskie osnovy radiotekhniki* [Theoretical foundations of Radio Engineering]. Moscow, Vysshaya shkola

Publ. 306 p.

9. Kaplun V.A., Brammer Yu. A., Lokhova S. P. and Shostak I. V. (2005) *Radio-tekhnicheskie ustroystva i elementy radiosistem* [Wireless devices and radio system elements]. Moskow, Vysshaya shkola Publ., 294 p.

10. Zaezdnyi A.M. (1961) *Garmonicheskii sintez v radiotekhnike i elektrosvyazi* [Harmonic synthesis in electronics and telecommunication]. Moskow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 535 p.

Горбачов М. М. Метод геометричного моделювання енергетичних негармонічних детермінованих процесів і його використання в радіотехніці. Запропоновано метод тривимірного геометричного моделювання енергетичних негармонічних детермінованих процесів в радіотехнічних колах (пристроях) зі змінним параметром при дії вхідних негармонічних сигналів. Наведено приклад використання цього метода.

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

Gorbachev M. N. Metod geometricheskogo modelirovaniya energeticheskikh negarmonicheskikh determinirovannykh protsessov i ego primeneniye v radiotekhnike. Predlozhen metod trekhmernogo geometricheskogo modelirovaniya energeticheskikh negarmonicheskikh determinirovannykh protsessov v radiotekhnicheskikh tsepyakh (ustroystvakh) s peremennym parametrom pri vozdeystvii vkhodnykh negarmonicheskikh signalov. Priveden primer primeneniya etogo metoda.

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

Gorbachev M. N. The metod of geometrical simulation of power nonharmonic determined processes and its application in radiotechnic.

The example three-dimensional mathematical simulation of determined periodic power processes in radiotechnic circuits (devices) with various parameters and with nonharmonic signals is discussed in this article. The new metod of geometrical simulation of these processes is used for founding three-dimentional models as curves named regime trajectories.

These three-dimensional models are disposed on a surface of sphere. The radius of sphere is equal unit. Variable voltage of the rectangular form is input periodic nonharmonic signal named meander. The regime trajectory is characterized periodic process as whole.

The effective of geometrical simulation method is consisted in universal, exactness and clear of three-dimensional models.

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