

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2020

январь–июнь

№ 1-2 (46-47)



Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредители

*Академия наук высшей школы России
Новосибирское отделение Академии наук высшей школы*

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клыماش, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
А.О. Давидов, д-р техн. наук
В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.
С.Л. Елистратов, д-р техн. наук
А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.
Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ
В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.
О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.
С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2002 г. (свидетельство ПИИ № 77-11517 от 04.01.2002 г.)

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 326, телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2020 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2020

January–June

№ 1-2 (46-47)



Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

*Russian Higher Education Academy of Science
Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science*

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)

D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)

A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)

E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)

M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)

K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.

A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.

I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.

A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)

V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)

A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.

G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.

O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.

V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.

A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.

S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.

S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.

V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc. (Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 326, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Рудяк В.Я., Белкин А.А.*
О динамическом хаосе фазовых траекторий
системы атомов кристалла7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Гринкевич В.А.*
Идентификация устройства на основе элемента Пельтье
методом наименьших квадратов.....17

- Киселев А.В., Сабитов Т.И., Степанов М.А.*
Двумерная частично когерентная геометрическая модель
распределенного радиолокационного объекта.....28

Кромм А.А., Симаков Г.М., Жук С.С.

Высокоскоростной наблюдатель магнитного состояния
на основе вентильного индукторного двигателя.....37

Нейман В.Ю.

Условия реализации предельного КПД электромагнитного
двигателя.....45

Сабитов Т.И.

Пространственно-фазовая фокусировка излучателей матрич-
ного имитатора на две точки приема60

Степанов М.А., Никулина Ю.С.

Необходимые условия физической реализуемости бифокаль-
ного линзового коллиматора.....68

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Rudyak V.Ya., Belkin A.A.

On the dynamic chaos of phase trajectories

of the system of crystal atoms7

TECHNICAL SCIENCES

Grinkevich V.A.

The identification of a device based on a Peltier element

by the least square method17

Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A.

A two-dimensional partially coherent geometric model

of a distributed radar object.....28

Kromm A.A., Simakov G.M., Zhuk S.S.

Highly dynamic observer of the magnetic state on the basis of the
ventiled inductor motor37

Neyman V.Yu.

Conditions of achieving electromagnetic motor
maximal efficiency45

Sabitov T.I.

Spatial-phase focusing of matrix simulator radiators
at two receiving points60

Stepanov M.A., Nikulin Yu.S.

Necessary conditions of physical realizability
of the bifocal lens collimator68

УДК 539.21; 519.62

**О ДИНАМИЧЕСКОМ ХАОСЕ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ СИСТЕМЫ
АТОМОВ КРИСТАЛЛА****В.Я. Рудяк^{1,2}, А.А. Белкин¹**¹*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*²*Новосибирский государственный университет*

В статье методом молекулярной динамики изучена устойчивость фазовых траекторий ионов кристалла NaCl относительно возмущения начальных данных. Показано, что имеет место локальная неустойчивость возмущений фазовых траекторий системы и в конфигурационном пространстве, и в пространстве скоростей. На начальной стадии малые возмущения растут экспоненциально, инкременты роста в том и другом случае одинаковы, они зависят от структуры кристалла и его температуры. С увеличением температуры инкременты роста увеличиваются. Далее рост возмущений замедляется, и они достигают «платового» значения, характерный размер которого в конфигурационном пространстве сопоставим с размером области локализации иона, а в пространстве скоростей – с его максимальной скоростью. Кроме того, установлено, что автокорреляционная функция скоростей всех ионов затухает до нуля, т. е. в системе помимо локальной неустойчивости фазовых траекторий наблюдается их перемешивание. Таким образом, в системе атомов кристаллического вещества имеет место динамический хаос.

Ключевые слова: фазовая траектория, локальная неустойчивость, перемешивание, динамический хаос, кристалл, молекулярная динамика.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-7-16

Введение

Метод молекулярной динамики (МД) сегодня является мощным средством моделирования самых разных физических явлений (см. [1] и цитируемую там литературу). Он с успехом используется при решении различных задач химии, биологии, медицины. Идея этого метода, сформулированная для частного случая еще в [2, 3], чрезвычайно проста и сводится к решению уравнений Ньютона (если моделируются классические системы), описывающих динамику рассматриваемой молекулярной системы. В результате получают фазовые переменные (координаты и скорости) всех молекул системы в последовательные моменты времени. Используя затем методы неравновесной статистической механики, с помощью этой информации можно рассчитать все наблюдаемые характеристики системы (плотность, давление, температуру, коэффициенты переноса и т. п.).

Поскольку при использовании метода МД речь практически всегда идет об изучении динамики большого числа частиц, то ясно, что численное решение большого числа уравнений приводит к систематическим ошибкам. Это ошибки, связанные с округлением чисел, конечным размером ячейки моделирования, конечным числом используемых частиц, схемами интегрирования уравнений Ньютона. В результате для газов и жидкостей было установлено, что при моделировании методом МД имеет место локальная неустойчивость фазовых траекторий и

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-01-00399, 20-01-00041

перемешивание [4–6]. Нередко высказывается мнение, что связано это лишь с неточностью решения системы уравнений Ньютона (см., например, [7]). И если разработать некоторый метод коррекции решения этих уравнений на каждом шаге, то получаемые фазовые траектории окажутся истинными. Это, конечно, заблуждение. Истинных траекторий нельзя получить даже для системы твердых сфер, где уравнений Ньютона вообще не приходится решать [8, 9]. Адекватные результаты МД моделирования свойств газов и жидкостей получаются лишь в результате усреднения полученных данных по большому числу независимых фазовых траекторий. Стоит заметить, что такой способ получения наблюдаемых величин является типичным и для физического эксперимента.

Наличие неустойчивости фазовых траекторий в неупорядоченных системах (газах и жидкостях) представляется достаточно естественным. Однако на практике метод МД широко применяется и для моделирования вполне упорядоченных систем: твердого тела, кристаллов и т.п. Атомы в таких системах локализованы вблизи их положения равновесия. И при МД моделировании их динамики нередко авторы не проводят усреднение полученных данных по независимым фазовым траекториям, считая, что получаемые в расчете фазовые траектории устойчивы. Насколько такой подход обоснован? Цель данной работы и состоит в изучении устойчивости фазовых траекторий атомов кристалла к начальным возмущениям.

1. Постановка задачи

Устойчивость фазовых траекторий в данной работе изучается на примере кристалла поваренной соли NaCl . Решетка этого кристалла состоит из положительных ионов натрия (малые шарики на рис. 1) и отрицательных ионов хлора. Ионы каждого типа двигаются вблизи своих положений равновесия – узлов кубической гранецентрированной решетки. Шаг этой решетки (расстояние между соседними ионами разного типа) $a = 0,564$ нм.

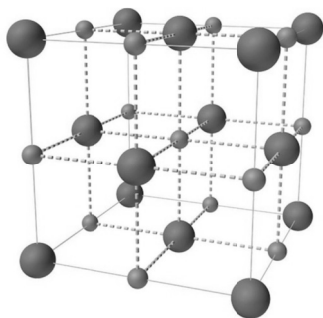


Рис. 1 – Структура кристаллической решетки хлорида натрия. Характерные размеры ионов для наглядности уменьшены
Fig. 1 – Structure of the sodium chloride crystal lattice. Characteristic ion sizes are reduced for clarity

Для МД моделирования динамики данной системы нужно задать потенциал взаимодействия между ионами. В настоящей работе использовался вариант широко распространенного потенциала погруженного атома [10] – потенциал погруженного иона (embedded ion model, EIM) [11]. В нем взаимодействие описывается двумя составляющими, одна из которых определяет парное взаимодействие двух ионов, вторая – коллективное взаимодействие иона с остальными, задаваемое так называемой функцией погружения. Потенциал EIM является многопараметрическим. МД моделирование выполнялось с помощью пакета LAMMPS, одним из достоинств которого является большое количество встроенных потенциалов взаимодействия, в том числе и набор потенциалов взаимодействия хлорида натрия [10, 11].

В начальный момент времени ионы в количестве $N = 2000$ размещались в ячейке моделирования кубической формы строго в узлах кристаллической решетки. По требуемой температуре им случайным образом задавались начальные скорости, скорость центра масс системы при этом равнялась нулю. Для моделирования объемных свойств кристалла использовались периодические граничные условия.

Динамика ионов рассматриваемого кристалла описывается системой уравнений Ньютона

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\mathbf{F}_i}{m_i}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где m_i , \mathbf{r}_i , \mathbf{v}_i – масса, радиус-вектор и вектор скорости i -го иона; \mathbf{F}_i – действующая на него равнодействующая сила. В результате решения уравнений (1) в последовательные моменты времени находится полный набор динамических переменных системы:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t), \dots, \mathbf{x}_N(t) = \mathbf{r}_1(t), \mathbf{v}_1(t), \dots, \mathbf{r}_N(t), \mathbf{v}_N(t). \quad (2)$$

Постановка задачи устойчивости относительно изменения начальных условий сводится к изучению эволюции векторов (2) для двух различных начальных условий. Итак, пусть заданы начальные условия

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (3)$$

и

$$\tilde{\mathbf{x}}(t_0) = \tilde{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{x}_0 + \delta. \quad (4)$$

Решая уравнения (1) при начальных условиях (3) и (4), получим две фазовые траектории и $\tilde{\mathbf{x}}(t)$. Будем дальше считать, что начальное возмущение δ мало. Тогда фазовая траектория $\mathbf{x}(t)$ называется устойчивой по Ляпунову, если для любых t_0 и $\epsilon > 0$ существует зависящая от t_0 и ϵ , но не зависящая от времени t величина δ , такая, что для всех $t > t_0$ выполняется условие

$$\lambda = |\tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t)| < \epsilon. \quad (5)$$

Таким образом, изучение устойчивости фазовых траекторий требует систематического вычисления эволюции функции λ . Вообще говоря, можно изучать устойчивость фазовых траекторий отдельно в физическом пространстве $\lambda_r = |\tilde{\mathbf{r}}(t) - \mathbf{r}(t)|$ и в пространстве скоростей $\lambda_v = |\tilde{\mathbf{v}}(t) - \mathbf{v}(t)|$, где $\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_1(t), \dots, \mathbf{r}_N(t)$, $\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_1(t), \dots, \mathbf{v}_N(t)$. Эти функции в расчетах определяются соотношениями:

$$\lambda_r = \frac{1}{aN} \left(\sum_{\alpha=x,y,z} \sum_{i=1}^N |\tilde{\mathbf{r}}_{i\alpha}(t) - \mathbf{r}_{i\alpha}(t)|^2 \right)^{1/2}; \quad (6a)$$

$$\lambda_v = \frac{1}{cN} \left(\sum_{\alpha=x,y,z} \sum_{i=1}^N |\tilde{\mathbf{v}}_{i\alpha}(t) - \mathbf{v}_{i\alpha}(t)|^2 \right)^{1/2}. \quad (6b)$$

Здесь c – среднеквадратичная скорость, a – начальное расстояние между соседними ионами. Шаг интегрирования уравнений движения (1) в МД моделировании равнялся одной фемтосекунде.

3. Локальная неустойчивость и перемешивание

На рис. 2 приведен фрагмент полученной в результате моделирования пространственной конфигурации ионов хлорида натрия и их траектории. Температура равна 300 К. Траектории строились в последовательные моменты времени $t_k = t_0 + \Delta t$ с достаточно большим шагом Δt , сопоставимым с временем взаимодействия пары ионов. Несмотря на то что эти траектории напоминают траектории броуновских частиц, ионы локализованы в областях вблизи узлов кристаллической решетки. «Броуновский» характер траекторий каждого из ионов обусловлен его коллективным взаимодействием с окружающими соседями и нестационарностью этого взаимодействия.

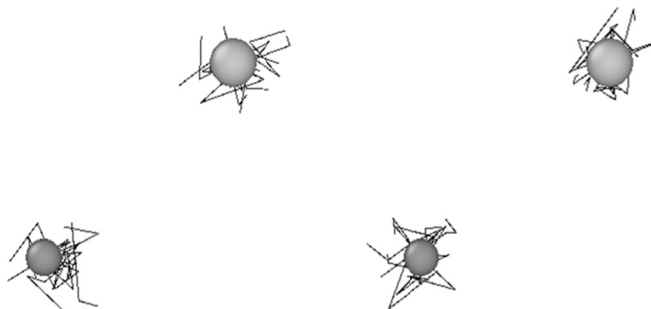


Рис. 2 – Траектории ионов натрия (малые шарики) и хлора
Fig. 2 – Trajectories of sodium ions (small balls) and chlorine

Как уже отмечалось, характер устойчивости фазовых траекторий в конфигурационном пространстве определяется эволюцией среднеквадратичного расстояния двух траекторий (6а) для ионов натрия. Эта эволюция для двух температур представлена на рис. 3, а. Здесь круглые и квадратные метки соответствуют температурам 350 и 300 К соответственно, а сплошная линия – аппроксимация функции (6а) экспонентой. Разница в массах ионов натрия и хлора невелика, поэтому график функция (6а) для ионов хлора выглядит практически так же. На начальном этапе эволюции имеет место экспоненциальный рост возмущений. Это означает, что в системе реализуется локальная неустойчивость.

Наличие неустойчивости фазовых траекторий относительно возмущений начальных данных имеет универсальный характер. Поэтому такая неустойчивость имеет место не только в конфигурационном пространстве, но и в пространстве скоростей системы. Зависимость среднеквадратичного отклонения (6б) от времени, описывающего неустойчивость в пространстве скоростей, представлена на рис. 3, б. Здесь эта функция нормирована на среднеквадратичную скорость ионов при температуре 300 К. Сплошная линия – снова аппроксимация функции (6б) экспонентой. Таким образом, и здесь на начальном участке имеет место локальная неустойчивость.

Инкременты роста возмущений, т. е. показатель экспоненты γ , как координат, так и скоростей практически одинаковы, отличия не превышают погрешности моделирования. При температуре 300 К $\gamma = 1,52 \pm 0,06$ (1/псек). Это значение определяется как структурными свойствами кристалла (средним расстоянием и законом взаимодействия между ионами), так и температурой. Естественно, с ростом температуры все процессы в системе будут ускоряться, инкременты роста возмущений увеличатся.

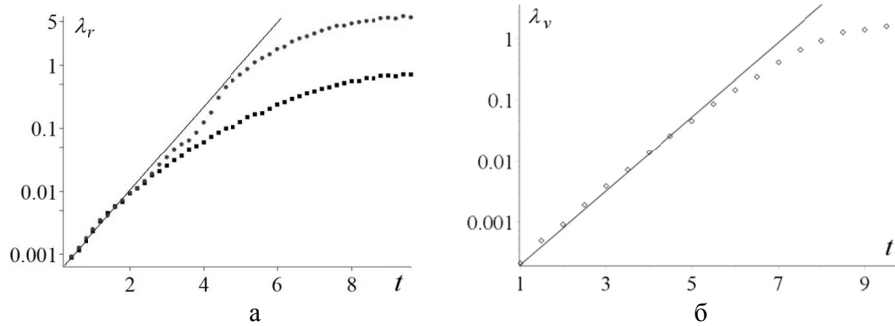


Рис. 3 – Зависимость от времени (в пикосекундах) логарифма среднего отклонения координат (а, в процентах от шага решетки) и скоростей (б) ионов натрия возмущенной системы

Fig. 3 – Time dependence (in picoseconds) of the logarithm of the average deviation of coordinates (а, as percentage of the lattice pitch) and velocities (б) of sodium ions of the perturbed system

В нелинейных динамических системах, в частности в молекулярных газах и жидкостях, имеет место динамический хаос (см., например, [4–9, 13–15]). Наличие локальной неустойчивости решений является необходимым условием, при выполнении которого возможно появление динамического хаоса в системе. Однако собственно хаотическое поведение не может быть описано с помощью локальных функционалов (6), которые являлись мерой локальной неустойчивости. Нелокальные по времени свойства хаотических процессов описываются корреляционными функциями. В простейшем случае эти функции двухвременные. Перемешивание, специфичное для хаотических процессов, обнаруживается по затуханию корреляционной функции данных величин. Типичной характеристикой перемешивания является двухвременная автокорреляционная функция скоростей (АКФС) рассматриваемой системы. В частности, например, АКФС ионов натрия определяется как

$$\chi_v(k\Delta t) = \frac{2}{N \langle \mathbf{v}_i^2 \rangle} \sum_{i=1}^{N/2} \mathbf{v}_i(t_0) \mathbf{v}_i(t_0 + k\Delta t), \quad (7)$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю.

Эволюция АКФС ионов натрия (7) представлена на рис. 4. Эта функция достаточно быстро затухает, хотя затухание носит сложный характер и на последних стадиях имеет квазипериодический характер. Тем не менее само наличие затухания корреляций указывает на то, что в рассматриваемой системе помимо локальной неустойчивости имеет место и перемешивание, а значит, и динамический хаос.

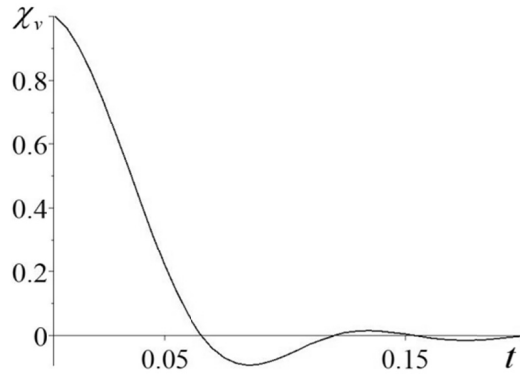


Рис. 4 – Зависимость от времени (в пикосекундах)
АКФС ионов натрия

Fig. 4. Time dependence (in picoseconds) of the velocity
autocorrelation function of sodium ions

Заключение

Таким образом, в данной работе показано, что в системе ионов кристалла NaCl так же, как и в неупорядоченных молекулярных системах, жидкостях и газах, имеет место динамический хаос. Поскольку в реальном МД моделировании всегда имеют место те или иные ошибки, то получение адекватных результатов моделирования требует систематического усреднения по независимым фазовым траекториям. Одновременно следует понимать, что ошибки в процессе такого численного моделирования вносятся практически на каждом шаге решения уравнений Ньютона. Это делает получаемые фазовые траектории принципиально необратимыми. Необратимость получаемых при этом фазовых траекторий является отражением реально наблюдаемой в природе необратимости. В этом смысле МД моделирование молекулярных систем является более адекватным, чем их описание посредством детерминированных уравнений Ньютона. Действительно, само появление динамического хаоса не означает, что эволюция динамической системы необратима. Если рассматриваемая динамическая система не возмущена, то ее фазовая траектория вполне детерминирована и обратима.

Нередко при МД моделировании вводят так называемое время обратимости или достоверности. Действительно, вблизи всякого времени t_0 можно выделить некоторый интервал τ , спустя который, если обратить время, можно вернуться в ϵ -окрестность начальной фазовой точки. Величина ϵ предсказуемо будет определяться длительностью интервала τ . Тем не менее разбегание траекторий всегда происходит экспоненциально быстро.

Теперь несколько слов о деталях. При формулировании свойств динамического хаоса математики обычно предполагают экспоненциальное затухание корреляций, что и определяет перемешивание фазовых траекторий. В физических системах экспоненциальный характер затухания корреляций является скорее экзотикой. Он реализуется лишь для разреженного газа или для так называемого газа Энскога [16]. Для плотного газа АКФС имеет две ветви: экспоненциальную ветвь и длинный степенной хвост [16, 17].

Стоит отметить, что линейная (экспоненциальная) стадия развития неустойчивости в конфигурационном и скоростном пространстве системы проходит на разных временах (рис. 3), хотя и близких. Замедление нарастания возмущений является типичным для всех систем, в том числе и для неупорядоченных

(см. [6, 8, 9]). В кристалле такое замедление кажется очень естественным, поскольку пространства конфигураций и скоростей ограничены, в первом случае подвижностью иона, а во втором – температурой кристалла. На самом деле ситуация несколько более тонкая. Она становится совершенно прозрачной, если при анализе динамики возмущений перейти в Фурье-представление. Тогда выяснится, что имеет место спектр неустойчивых возмущений, среди которых есть наиболее неустойчивое. Именно его нарастание и определяет экспоненциальный рост возмущений. Затем, когда возмущение достигает некоторой амплитуды, включаются нелинейные взаимодействия различных мод, что и приводит к замедлению нарастания возмущений.

В заключение отметим, что в данной работе изучались фазовые траектории некоторой специфической системы – кристалла NaCl. Однако ясно, что все установленные качественные закономерности не зависят от того, какое кристаллическое вещество рассматривается. Изменение типа решетки, расстояния между ионами, потенциала взаимодействия приведет лишь к количественным изменениям. Замена ионов на нейтральные атомы также непринципиальна с точки зрения особенностей неустойчивости фазовых траекторий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rapaport D.C.** The art of molecular dynamics simulations. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 549 p.
2. **Alder B., Wainwright T.** Studies in molecular dynamics. I. General method // The Journal of Chemical Physics. – 1959. – Vol. 31, N 2. – P. 459–466.
3. **Alder B., Wainwright T.** Studies in molecular dynamics. II. Behavior of a small number of elastic spheres // The Journal of Chemical Physics. – 1960. – Vol. 33, N 5. – P. 1439–1451.
4. **Норман Г.Э., Стегайлов В.В.** Стохастические свойства молекулярно-динамической Ленард-Джонсовской системы в равновесном и неравновесном состояниях // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2001. – Т. 119, № 5. – С. 1011–1020.
5. **Norman G.E., Stegailov V.V.** Stochastic and dynamic properties of molecular dynamics systems: simple liquids, plasma and electrolytes, polymers // Computer Physics Communications. – 2002. – Vol. 147, iss. 1–2. – P. 678–683. – DOI: 10.1016/S0010-4655(02)00376-4.
6. **Норман Г.Э., Стегайлов В.В.** Стохастическая теория метода классической молекулярной динамики // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24, № 6. – С. 3–44.
7. **Komatsu N., Abe T.** Numerical irreversibility in time reversible molecular dynamics simulation // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2004. – Vol. 195, iss. 3–4. – P. 391–397. – DOI: 10.1016/j.physd.2004.05.004.
8. **Рудяк В.Я., Иванов Д.А.** Компьютерное моделирование динамики конечного числа взаимодействующих частиц // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2003. – № 1. – С. 30–38.
9. **Рудяк В.Я., Иванов Д.А.** Динамические и стохастические свойства открытой системы конечного числа упруго взаимодействующих частиц // Труды ИГАСУ. – 2004. – Т. 7, № 3. – С. 47–58.
10. **Daw M.S., Baskes M.** Embedded-atom method: derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // Physical Review B. – 1984. – Vol. 29, N 12. – P. 6443–6453. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.502.57.
11. **Zhou X.W., Doty F.P.** Embedded-ion method: an analytical energy-conserving charge-transfer interatomic potential and its application to the La-Br system // Physical Review B. – 2008. – Vol. 78, N 22. – P. 224307. – DOI: 10.1103/PhysRevB.78.224307.
12. **Ляпунов А.М.** Собрание сочинений. Т. 2. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 481 с.
13. **Данилов А.Ю.** Лекции по нелинейной механике. – М.: Постмаркет, 2001. – 184 с.
14. **Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.** Современные проблемы нелинейной динамики. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с.
15. **Рудяк В.Я.** Механика, процессы переноса, флуктуации и необратимость. – Новосибирск: ИГАСУ, 2011. – 268 с.

16. Рудяк В.Я. Статистическая аэрогидромеханика гомогенных и гетерогенных сред. Т. 2. Гидромеханика. – Новосибирск: НГАСУ, 2005. – 470 с.
17. Alder B., Wainwright T. Decay of the velocity autocorrelation function // Physical Review A. – 1970. – Vol. 1, N 1. – P. 18–21.

ON THE DYNAMIC CHAOS OF PHASE TRAJECTORIES OF THE SYSTEM OF CRYSTAL ATOMS

Rudyak V.Ya.^{1,2}, Belkin A.A.¹

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

²Novosibirsk State University, Russia

The molecular dynamics method is used to study the stability of phase trajectories of ions of a NaCl crystal to the perturbation of the initial data. It is shown that there is a local instability of perturbations of the phase trajectories of the system both in the configuration space and in the velocity space. At the initial stage, small perturbations grow exponentially, growth increments are the same in both cases, and they depend on the structure of the crystal and its temperature. With increasing the temperature, growth increments increase too. Further, the growth of perturbations slows down, and they reach a “plateau” value, the characteristic size of which in the configuration space is comparable with the size of the ion localization region, and in the velocity space with its maximum velocity. In addition, it was found that the velocity autocorrelation function of all ions decays to zero, i.e., their mixing takes place in the system in addition to the local instability of phase trajectories. Thus, a dynamic chaos takes place in the system of atoms of crystalline matter.

Keywords: phase trajectory, local instability, mixing, dynamic chaos, crystal, molecular dynamics.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-7-16

REFERENCES

1. Rapaport D.C. *The art of molecular dynamics simulations*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004. 549 p.
2. Alder B., Wainwright T. Studies in molecular dynamics. I. General method. *The Journal of Chemical Physics*, 1959, vol. 31, no. 2, pp. 459–466.
3. Alder B., Wainwright T. Studies in molecular dynamics. II. Behavior of a small number of elastic spheres. *The Journal of Chemical Physics*, 1960, vol. 33, no. 5, pp. 1439–1451.
4. Norman G.E., Stegailov V.V. The stochastic properties of a molecular-dynamical Lennard-Jones system in equilibrium and nonequilibrium states. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2001, vol. 92, no. 5, pp. 879–886. DOI: 10.1134/1.1378182. Translated from *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 2001, vol. 119, no. 5, pp. 1011–1020.
5. Norman G.E., Stegailov V.V. Stochastic and dynamic properties of molecular dynamics systems: simple liquids, plasma and electrolytes, polymers. *Computer Physics Communications*, 2002, vol. 147, iss. 1–2, pp. 678–683. DOI: 10.1016/S0010-4655(02)00376-4.
6. Norman G.E., Stegailov V.V. Stochastic theory of the classical molecular dynamics method. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2013, vol. 5, iss. 4, pp. 305–333. DOI: 10.1134/S2070048213040108. Translated from *Matematicheskoe modelirovanie*, 2012, vol. 24, iss. 6, pp. 3–44.
7. Komatsu N., Abe T. Numerical irreversibility in time reversible molecular dynamics simulation. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2004, vol. 195, iss. 3–4, pp. 391–397. DOI: 10.1016/j.physd.2004.05.004.
8. Rudyak V.Ya., Ivanov D.A. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki konechnogo chisla vzaimodeistvuyushchikh chastits [Computer simulation of the dynamics of a finite number of interacting particles]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2003, no. 1, pp. 30–38.
9. Rudyak V.Ya., Ivanov D.A. Dinamicheskie i stokhasticheskie svoistva otkrytoi sistemy konechnogo chisla uprugo vzaimodeistvuyushchikh chastits [Dynamic and stochastic properties of an open system of a finite number of elastically interacting particles]. *Trudy NGASU = Proceedings NSUACE*, 2004, vol. 7, no. 3, pp. 47–58.

10. Daw M.S., Baskes M. Embedded-atom method: derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals. *Physical Review B*, 1984, vol. 29, no. 12, pp. 6443–6453. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.502.57.
11. Zhou X.W., Doty F.P. Embedded-ion method: an analytical energy-conserving charge-transfer interatomic potential and its application to the La-Br system. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 22, p. 224307. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.144110.
12. Liapunov A.M. *Sobranie sochinenii. T. 2.* [Collected works. Vol. 2]. Moscow-Leningrad: Academy of Science USSR, 1956, 481 p.
13. Danilov A.Yu. *Lektsii po nelineinoi mekhanike* [Lectures on nonlinear mechanics]. Moscow, Postmarket Publ., 2001. 184 p.
14. Malinetskii G.G., Potapov A.B. *Sovremennye problemy nelineinoi dinamiki* [Modern problems of nonlinear dynamics]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2000. 336 p.
15. Rudyak V.Ya. *Mekhanika, protsessy perenosa, fluktuatsii i neobrattimost'* [Mechanics, transport processes, fluctuations and irreversibility]. Novosibirsk, NSUACE Publ., 2011. 268 p.
16. Rudyak V.Ya. *Statisticheskaya aerogidromekhanika gomogennykh i geterogennykh sred. T. 2. Gidromekhanika* [Statistical aerohydrodynamics of homogeneous and heterogeneous media. Vol. 2. Hydromechanics]. Novosibirsk, NSUACE Publ., 2005. 470 p.
17. Alder B., Wainwright T. Decay of the velocity autocorrelation function. *Physical Review A*, 1970, vol. 1, no. 1, pp. 18–21.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Рудяк Валерий Яковлевич – родился в 1945 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, кафедра теоретической механики, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). Области научных интересов: кинетическая теория плотных и разреженных газов, неравновесная статистическая механика процессов переноса, физика и механика дисперсных жидкостей, процессы переноса в газах, жидкостях и в наножидкостях, теория ламинарно-турбулентного перехода, моделирование и изучение макро-, микро- и нанотечений ньютоновских и неньютоновских жидкостей. Опубликовано более 500 научных работ. (Адрес: 630008, Россия, г. Новосибирск, Ленинградская, 113. E-mail: valery.rudyak@mail.ru).

Rudyak Valery Yakovlevich (b. 1945) – Doctor of Sciences (Phys & Math.), professor, chief of researcher, Theoretical Mechanics Department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. His research interests are currently focused on the kinetic theory of dense and rarefied gases, nonequilibrium statistical mechanics of transport processes, physics and mechanics of dispersed fluids, transport processes in gases, the liquids and nanofluids, theory of laminar-turbulent transition, modeling and study of macro-, micro- and nanoflows of Newtonian and non-Newtonian liquids. He is the author of more than 500 scientific papers. (Address: 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian. E-mail: valery.rudyak@mail.ru).



Белкин Александр Анатольевич – родился в 1969 году, д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической механики, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). Области научных интересов: неравновесная статистическая механика процессов переноса в дисперсных жидкостях, включая наножидкости, микро- и нанотечения жидкостей, моделирование методом молекулярной динамики. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 630008, Россия, г. Новосибирск, Ленинградская, 113. E-mail: a.belkin@sibstrin.ru).

Belkin Alexandr Anatolievich (b. 1969) – Doctor of Sciences (Phys & Math.), associate professor, Head of the Theoretical Mechanics Department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. His research interests are currently focused on nonequilibrium statistical mechanics of transport processes in dispersed fluids, including nanofluids, micro and nanoflows, molecular dynamics simulations. He is the author of more than 100 scientific papers. (Address: 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation. E-mail: a.belkin@sibstrin.ru).

*Статья поступила 20 марта 2020 г.
Received March 20, 2020*

To Reference:

Rudyak V.Ya., Belkin A.A. O dinamicheskom khaose fazovykh traektorii sistemy atomov kristalla [On the dynamic chaos of phase trajectories of the system of crystal atoms]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 6–16. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-7-16.

УДК 51-74:62-52+536.5

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТА
ПЕЛЬТЬЕ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ****В.А. Гринкевич***Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН*

В статье рассматривается оценка параметров математической модели нелинейного объекта с запаздыванием. Объектом идентификации в данной работе является термостоллик на основе элемента Пельтье. Для идентификации подавалось несколько реализаций входных сигналов на вход объекта идентификации. Для расчета параметров нелинейного дифференциального уравнения, описывающего объект идентификации, применен метод наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов использован для идентификации по причине простоты его реализации и возможности идентификации нелинейных объектов. Приведены значения параметров математической модели, полученных в результате идентификации. Показаны графики изменения температуры в системе управления температурой с рассчитанным регулятором на основе полученной математической модели в результате идентификации. Выяснено, что полученная модель в результате идентификации может быть применена для расчета регуляторов для нелинейных систем, в частности для термостоллика на основе элемента Пельтье, а также при проектировании самонастраивающихся регуляторов. Однако предложенный в данной работе метод наименьших квадратов не позволяет оценить время запаздывания. Поэтому время запаздывания предварительно оценено по переходным процессам по температуре. Идентификация динамических объектов применяется, когда требуется получить структуру математической модели и оценить значения параметров исходя из входного и выходного сигнала объекта управления. Кроме того идентификация применяется при автоматической настройке регуляторов. Математическая модель объекта управления необходима для расчета регулятора, который используется для обеспечения требуемой точности и устойчивости систем управления. Элементы Пельтье применяются при проектировании термостатов малой мощности и малых размеров. Термостаты на основе элемента Пельтье могут обеспечить температуру как выше температуры окружающей среды, так и ниже.

Ключевые слова: идентификация, математическая модель, метод наименьших квадратов, нелинейный объект, термостоллик, элемент Пельтье.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27

Введение

Элементы Пельтье [1] применяются для конструирования термостатов малой мощности [2], формирователей температурных воздействий на растения [3, 4], термостатирования лазеров, ПЗС-матриц и биоматериалов [5]. Также элементы Пельтье применяются в формирователях температурного профиля [6], массажерах кожи человека, водяных кулерах, управляемых термостолликах [7] и термоэлектрических холодильниках [8]. Температурным профилем [6] называется закон изменения температуры от времени.

Идентификация [9] объектов управления применяется для дальнейшего расчета регуляторов, а также для проектирования самонастраивающихся систем.

В данной статье в качестве объекта идентификации рассматривается управляемый термостоллик на основе элемента Пельтье. С целью обеспечения требуемой точности и других технических требований необходимо применять регулятор

температуры. Для расчета регулятора температуры необходимо вывести математическую модель объекта управления. Для таких задач применяется идентификация [9]. Существует множество учебных пособий и публикаций, посвященных идентификации динамических объектов, например [9–13]. Однако в большей их части рассматривается идентификация линейных объектов. Для идентификации объектов с применением нейронных сетей [13] требуется обучать нейронную сеть. В работе [1] на основе графиков переходных процессов предложена структура математической модели элемента Пельтье и эмпирически оценены параметры. Однако эмпирические методы не всегда являются эффективными, поэтому в данной работе рассматривается идентификация термостоллика на основе элемента Пельтье с применением метода наименьших квадратов [11].

Метод наименьших квадратов и его модификации широко применяются для оценки импульсной характеристики линейных объектов. Для нелинейных объектов с помощью метода наименьших квадратов можно оценить параметры нелинейного дифференциального уравнения, описывающего объект идентификации. Недостатком такого метода является необходимость вычисления производных, что при наличии высокочастотных помех повышает погрешность идентификации.

1. Постановка задачи

В данной работе рассматривается параметрическая идентификация термостоллика на основе элемента Пельтье (рис. 1). Выходной величиной объекта идентификации является температура его рабочей поверхности, а входной величиной – протекаемый через элемент Пельтье ток.

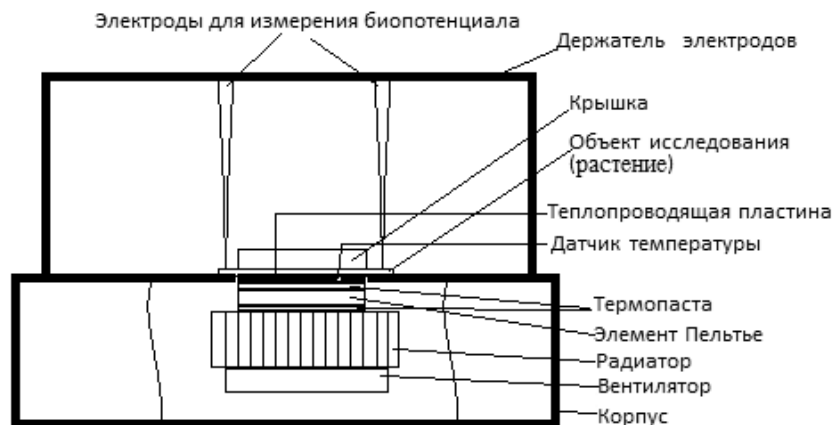


Рис 1 – Схема термостоллика

Fig 1 – The diagram of the temperature stage

В данной статье сторона элемента Пельтье, воздействующая на рабочую поверхность термостоллика, названа рабочей стороной, противоположная ей сторона – радиаторной. Рабочая сторона элемента Пельтье, теплопроводящая пластина, датчик температуры, объект исследования составляют рабочий объем термостоллика.

Целью работы является оценка параметров математической модели термостоллика методом наименьших квадратов. В данной работе используется структура математической модели термостоллика, полученная в статье [1]. Для оценки параметров сняты переходные процессы по температуре при различных токах.

В работе [1] рассмотрен синтез регулятора методом разделения движений для термостоллика на основе элемента Пельтье и выяснено, что наиболее подходящей структурой алгоритма управления является ПИД-регулятор с общим множителем, зависимым от тока и температуры. Для расчета общего множителя регулятора использовались значения параметров математической модели термостоллика на основе элемента Пельтье. В статье [1] эмпирически оценивались параметры математической модели термостоллика. Однако эмпирическая оценка параметров может проводиться долгое время и дать неточные значения параметров. В связи с этим в данной работе исследуется применение метода наименьших квадратов для устройства на основе элемента Пельтье.

2. Идентификация математической модели для термостоллика

В работе [1] выведена структура математической модели термостоллика в виде

$$T_c \frac{dT}{dt} + T = T_{\text{рабс}}(t - t_{\text{зап}}),$$

$$\frac{dT_{\text{рабс}}}{dt} = \frac{(a_1 T + a_2 I)I + a_4 (T_{\text{ос}} - T_{\text{рабс}})}{a_3}, \quad (1)$$

где T_c – параметр, учитывающий динамику распространения тепла от элемента Пельтье к поверхности термостоллика; T – температура рабочей поверхности термостоллика; t – время; $T_{\text{рабс}}$ – температура рабочей стороны элемента Пельтье; $t_{\text{зап}}$ – время запаздывания; a_1 – параметр, учитывающий эффект Пельтье; a_2 – параметр, учитывающий электрическое сопротивление элемента Пельтье; a_4 – параметр, учитывающий теплообмен с окружающей средой; a_3 – параметр, учитывающий теплоемкость рабочего объема термостоллика.

Из графика на рис. 5 следует, что время запаздывания $t_{\text{зап}} = 1,5$ с. Преобразуем (1) к виду

$$T_c \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \frac{dT(t)}{dt} = \frac{a_1 T(t - t_{\text{зап}})I(t - t_{\text{зап}}) + a_2 I^2(t - t_{\text{зап}})}{a_3} +$$

$$+ \frac{a_4 (T_{\text{ос}}(t - t_{\text{зап}}) - T_{\text{рабс}}(t - t_{\text{зап}}))}{a_3}. \quad (2)$$

В силу того, что температура $T_{\text{рабс}}$ недоступна для измерения, заменим $T_{\text{рабс}}$ в уравнении (2) на T и получим

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \frac{1}{T_c} \frac{dT(t)}{dt} = \frac{a_1 T(t - t_{\text{зап}})I(t - t_{\text{зап}}) + a_2 I^2(t - t_{\text{зап}})}{a_3 T_c} +$$

$$+ \frac{a_4 (T_{\text{ос}}(t - t_{\text{зап}}) - T(t - t_{\text{зап}}))}{a_3 T_c}. \quad (3)$$

Введем

$$\tau = t - t_{\text{зап}},$$

$$q_1(\tau) = T(\tau)I(\tau),$$

$$q_2(\tau) = T_{\text{oc}}(\tau) - T(\tau).$$

Переход от математической модели (2) к (3) скажется на значении параметров. Представим (3) в виде

$$\frac{d^2T(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dT(t)}{dt} + b_2 I^2(\tau) + b_3 q_1(\tau) + b_4 q_2(\tau) = 0. \quad (4)$$

Для определения параметров b_1, \dots, b_4 воспользуемся методом наименьших квадратов, суть которого заключается в выборе таких параметров b_1, \dots, b_4 , для которых сумма квадратов отклонений левой части уравнения (4) от правой для всех отсчетов по времени будет минимальной.

$$F = \sum_n \left((0 - \theta_n)^2 \right),$$

где n – номер отсчета,

$$\theta_n = \frac{d^2T(t_n)}{dt^2} + b_1 \frac{dT(t_n)}{dt} + b_2 I^2(\tau_n) + b_3 q_1(\tau_n) + b_4 q_2(\tau_n).$$

$$F \rightarrow \min.$$

Необходимым условием локального минимума является нулевое значение частных производных. В результате получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial b_1} &= \sum_n \left(2(0 - \theta_n) \frac{dT(t_n)}{dt} \right); \\ \frac{\partial F}{\partial b_2} &= \sum_n \left(2(0 - \theta_n) I^2(\tau_n) \right); \\ \frac{\partial F}{\partial b_3} &= \sum_n \left(2(0 - \theta_n) q_1(\tau_n) \right); \\ \frac{\partial F}{\partial b_4} &= \sum_n \left(2(0 - \theta_n) q_2(\tau_n) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_1} = 0;$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_2} = 0;$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_3} = 0;$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_4} = 0. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует

$$\begin{aligned} & b_1 \cdot \sum_n \left(\left(\frac{dT(t_n)}{dt} \right)^2 \right) + b_2 \sum_n \left(I^2(\tau_n) \frac{dT(t_n)}{dt} \right) + b_3 \times \\ & \times \sum_n \left(q_1(\tau_n) \frac{dT(t_n)}{dt} \right) + b_4 \cdot \sum_n \left(q_2(\tau_n) \frac{dT(t_n)}{dt} \right) = \\ & = - \sum_n \left(\frac{d^2 T(t_n)}{dt^2} \frac{dT(t_n)}{dt} \right); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & b_1 \cdot \sum_n \left(\frac{dT(t_n)}{dt} I^2(\tau_n) \right) + b_2 \cdot \sum_n I^4(\tau_n) + b_3 \cdot \sum_n (q_1(\tau_n) I^2(\tau_n)) + \\ & + b_4 \cdot \sum_n (q_2(\tau_n) I^2(\tau_n)) = - \sum_n \left(\frac{d^2 T(t_n)}{dt^2} I^2(\tau_n) \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & b_1 \cdot \sum_n \left(\frac{dT(t_n)}{dt} q_1(\tau_n) \right) + b_2 \cdot \sum_n (q_1(\tau_n) I^2(\tau_n)) + b_3 \times \\ & \times \sum_n \left((q_1(\tau_n))^2 \right) + b_4 \sum_n (q_2(\tau_n) q_1(\tau_n)) = - \sum_n \left(\frac{d^2 T(t_n)}{dt^2} q_1(\tau_n) \right); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & b_1 \cdot \sum_n \left(\frac{dT(t_n)}{dt} q_2(\tau_n) \right) + b_2 \cdot \sum_n (I^2(\tau_n) q_2(\tau_n)) + b_3 \times \\ & \times \sum_n (q_1(\tau_n) q_2(\tau_n)) + b_4 \sum_n \left((q_2(\tau_n))^2 \right) = - \sum_n \left(\frac{d^2 T(t_n)}{dt^2} q_2(\tau_n) \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Для эффективной оценки параметров b_1, \dots, b_4 для нелинейного объекта требуется провести идентификацию при нескольких вариантах входных сигналов (рис. 2, б), подаваемых на объект идентификации. При использовании метода наименьших квадратов предоставляется возможность объединения всех массивов температуры и тока, полученных при измерении, в один массив температуры и тока с соблюдением последовательности. Решив систему уравнений (7–10) методом Крамера, получим $b_1 = 0,39$, $b_2 = -0,00396$, $b_3 = -0,0002384$, $b_4 = -0,000948$.

3. Сравнение метода наименьших квадратов с эмпирической идентификацией

После расчета b_1, b_2, b_3, b_4 , получаем: $T_c = 2.56$ с, $a_2/a_3 = 0,0261$, $a_1/a_3 = 0,00157$, $a_4/a_3 = 0,0615$. В работе [1] с применением эмпирической идентификации были получены следующие значения: $T_c = 4$ с, $a_2/a_3 = 0,0266$, $a_1/a_3 = 0,0023$, $a_4/a_3 = 0,0025$. Из результатов работы [1] следует, что нужно использовать переменный общий коэффициент k_0 ПИД-регулятора, зависящий от тока и температуры, для улучшения качества регулирования. В работе [1] исследовалось регулирование при общем коэффициенте, вычисляемом по формулам (11)–(13).

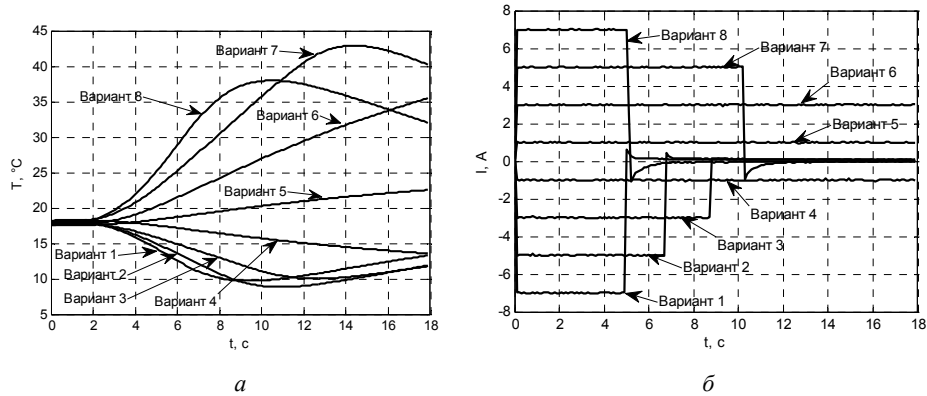


Рис 2 – Переходные процессы при заданном токе:

a – графики изменения температуры при соответствующих вариантах задания тока на рис 5, b ; b – варианты заданных токов для исследования нелинейности термостойлика на основе элемента Пельтье

Fig 2 – Transient processes at specified current:

a is the plots of the temperature change for the versions of desired currents in Fig 5, b ; b is the desired current variants to study the non-linearity of the temperature stage based on a Peltier element

$$k_0 = \frac{a_3 T_c}{a_2 I + a_1 T}; \quad (11)$$

$$k_0 = \frac{0,2 a_3 T_c}{a_2 I + a_1 T}; \quad (12)$$

$$k_0 = \frac{0,2 a_3 T_c}{1,56 a_2 I + a_1 T}. \quad (13)$$

Из результатов работы [1] следует, что с применением формулы (11) переходные процессы имеют колебательный характер вследствие пренебрежения запаздыванием при расчете коэффициентов регулятора температуры. Также в статье [1] исследовано, что при расчете изменяющегося общего коэффициента по формуле (13) регулирование более эффективное при быстром изменении температуры, чем при расчете k_0 по формуле (12).

В статье [1] отношение a_2/a_1 равно 11,56. В настоящей статье отношение a_2/a_1 равно 16,62, что ближе к значению $1,56 a_2/a_1$, вычисленному методом эмпирической идентификации в работе [1].

4. Исследование регулирования температуры

В этом разделе показаны результаты при рассчитанном коэффициенте k_0 с применением параметров математической модели, полученных с помощью идентификации по методу наименьших квадратов. На графиках заданная (желаемая) температура обозначена как T_d , а температура с датчика – как T .

На рис. 3, a и b показаны процессы в системе регулирования температурой при использовании k_0 , рассчитываемого по формуле (11), и параметров, полученных в данной работе. Как видно, процессы имеют колебательный характер. На рис. 4, a и b показаны процессы в системе регулирования температурой при использовании k_0 ,

рассчитываемого по формуле (12), и параметров, полученных в данной работе. Как видно, качество регулирования температуры соответствует требованиям.

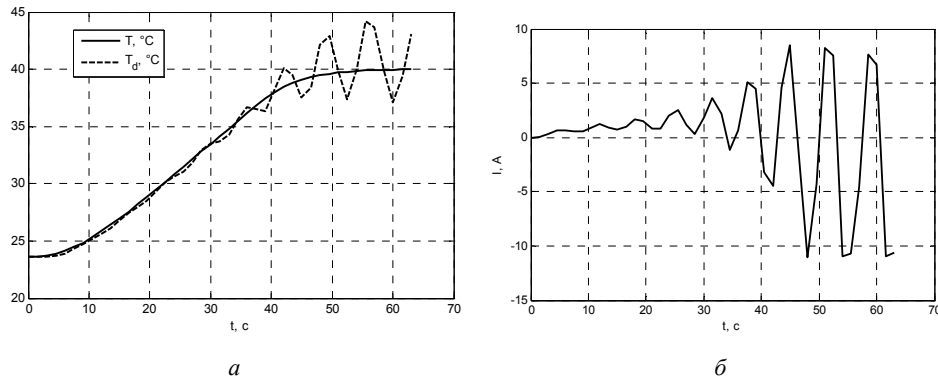


Рис. 3 – Процессы в системе управления температурой:

a – процессы по температуре при общем коэффициенте ПИД-регулятора, рассчитанном по формуле (11); *b* – процессы по току при общем коэффициенте ПИД-регулятора, рассчитанном по формуле (11)

Fig. 3. Processes in the temperature control system:

a is temperature processes with the shared coefficient of the PID-controller calculated by the formula (11); *b* is current processes with the shared coefficient of the PID-controller calculated by the formula (11)

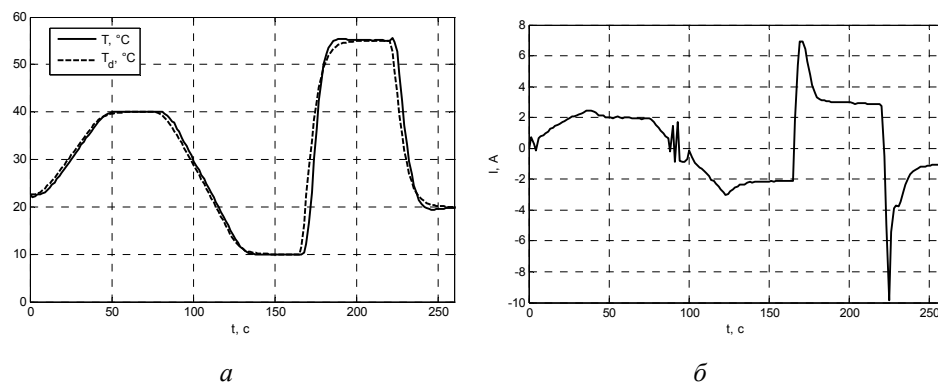


Рис. 4 – Процессы в системе управления температурой:

a – процессы по температуре при общем коэффициенте ПИД-регулятора, рассчитанном по формуле (12); *b* – процессы по току при общем коэффициенте ПИД-регулятора, рассчитанном по формуле (12)

Fig. 4 – Processes in the temperature control system:

a is temperature processes with the shared coefficient of the PID-controller calculated by the formula (12); *b* is current processes with the shared coefficient of the PID-controller calculated by the formula (12)

На рис. 5, *a* и *б* показаны процессы в системе регулирования температурой при использовании k_0 , рассчитываемого по формуле (14), и параметров математической модели термостоллика, полученных в данной работе. Как видно, качество регулирования температуры соответствует требованиям.

$$k_0 = \frac{0,25a_3T_c}{1,7a_2I + a_1T}. \quad (14)$$

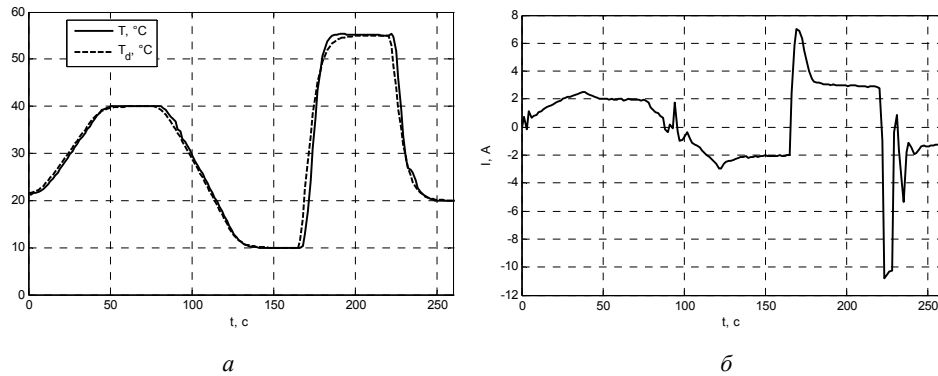


Рис. 5 – Процессы в системе управления температурой с общим коэффициентом ПИД-регулятора, рассчитанным по формуле (14):

a – процессы по температуре; *b* – процессы по току

Fig. 5 – Processes in the temperature control system with the PID-controller shared coefficient calculated by the formula (14):

a is temperature processes, *b* is current processes

На рис. 6 показана структурная схема ПИД-регулятора температуры, для которого параметры k_p , k_i , k_d , τ рассчитаны в статье [1].

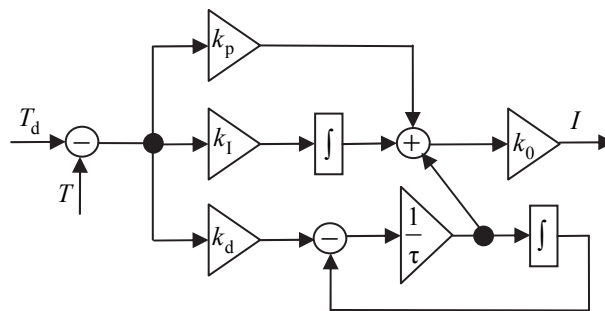


Рис. 6 – Структурная схема ПИД-регулятора

Fig. 6 – The block diagram of the PID controller

5. Обсуждение результатов

Результаты работы показывают, что метод наименьших квадратов позволяет определить параметры дифференциального уравнения нелинейного объекта с запаздыванием, однако время запаздывания необходимо предварительно оценить по графику переходных процессов на рис. 2. В частности, данный метод может быть применен для идентификации устройств на основе элемента Пельтье. Из рис. 3–5 следует, что математическую модель, полученную в результате идентификации предложенным методом, можно применять для расчета регулятора для устройств на основе элемента Пельтье.

Заключение

Исследовано применение метода наименьших квадратов для идентификации нелинейного объекта с запаздыванием на примере термостоллика на основе эле-

мента Пельтье. Выполнено сравнение идентификации на основе метода наименьших квадратов с эмпирическим методом, предложенным в работе [1]. Метод наименьших квадратов подходит для идентификации нелинейных объектов (устройств на основе элемента Пельтье).

Предложенный в данной работе метод можно использовать для идентификации нелинейных объектов с запаздыванием. Полученную в результате идентификации математическую модель можно применять при синтезе регуляторов, а также для проектирования самонастраивающихся систем управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гринкевич В.А.** Синтез регулятора температуры для термостолка на основе элемента Пельтье // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 1 (78). – С. 55–74. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74.
2. Полупроводниковый термостат для лабораторных исследований «ТС-20» / И.П. Егорова, Ю.И. Иванов, С.Н. Колесников, Г.И. Сидоров // Известия ТРТУ. – 2002. – № 6 (29). – С. 121–123.
3. **Сероклинов Г.В., Гунько А.В.** Информационные технологии при исследовании изменения биопотенциала растений от действия температуры // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): труды XII международной конференции, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 72–75.
4. **Сероклинов Г.В.** Задачи автоматизации экспериментальных исследований сложных биофизических объектов // Методы и технические средства исследований физических процессов в сельском хозяйстве: сборник научных трудов СибФТИ. – Новосибирск, 2001. – С. 46–53.
5. **Магомедов Д.А., Хазамова Л.А., Миспахов И.Ш.** Малогабаритный термостат для перевозки биоматериалов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. – СПб., 2015. – С. 458–460.
6. **Парфенов А.** Температурный профиль конвекционной пайки. Что это такое? // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 2 (30). – С. 29–30.
7. Термостолк для микроскопа на элементах Пельтье / Н.С. Безруков, А.Н. Одириев, К.Ф. Килимиченко, Ю.М. Перельман // Системный анализ в медицине (САМ 2017): материалы XI международной научной конференции, 19–20 октября 2017 г. – Благовещенск, 2017. – С. 47–52.
8. **Тарукин Е.М.** Авторефрижераторы // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 6 (13). – С. 68–82.
9. **Епанешников В.Д., Епанешникова И.В.** Модель структурной идентификации непрерывных динамических объектов // Информатика и системы управления. – Благовещенск, 2017. – № 1 (51). – С. 53–63. – DOI: 10.22250/isu.2017.51.53-63.
10. **Раскина А.В.** Определение структуры линейного динамического объекта в задачах непараметрической идентификации // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 891–898.
11. **Чикильдин Г.П., Маевский И.В.** Алгоритм определения частоты регуляризации в МНК идентификации импульсной и частотных характеристик // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3 (25). – С. 62–68.
12. **Стрижнев А.Г., Марков А.В., Русакович А.Н.** Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2012. – № 5 (67). – С. 65–72.
13. **Аверкин А.Н., Повидало И.С.** Идентификация динамических объектов с помощью нейронных сетей на основе самоорганизующихся карт Кохонена // Системный анализ в науке и образовании. – 2012. – № 2. – С. 1–9.

THE IDENTIFICATION OF A DEVICE BASED ON A PELTIER ELEMENT BY THE LEAST SQUARES METHOD

Grinkevich V.A.

*Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies Russian Academy
of Science, Krasnoobsk, Russia*

The evaluation of the mathematical model parameters of a non-linear object with a transport delay is considered in this paper. A temperature controlled stage based on a Peltier element is an identification object in the paper. Several input signal implementations are applied to the input of the identification object. The least squares method is applied for the calculation of the non-linear differential equation parameters which describe the identification object. The least squares method is used due to its simplicity and the possibility of identification non-linear objects. The parameters values obtained in the process of identification are provided. The plots of temperature changes in the temperature control system with a controller designed based on the mathematical model of the control object obtained as a result of identification are shown. It is found that the mathematical model obtained in the process of identification may be applied to design controllers for non-linear systems, in particular for a temperature stage based on a Peltier element, and for self-tuning controllers. However, the least square method proposed in the paper cannot estimate the transport delay time. Therefore it is required to evaluate the time delay by temperature transient processes. Dynamic object identification is applied when it is required to obtain a mathematical model structure and evaluate the parameters by an input and output control object signal. Also, identification is applied for auto tuning of controllers. A mathematical model of a control object is required to design the controller which is used to provide the required accuracy and stability of control systems. Peltier elements are applied to design low-power and small-size temperature stage. Hot benches based on a Peltier element can provide the desired temperature above and below ambient temperature.

Keywords: identification, mathematical model, least squares method, non-linear object, temperature stage, Peltier element.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27

REFERENCES

1. Grinkevich V.A. Sintez regulatora temperatury dlya termostolika na osnove elementa Pel't'e [Temperature controller design for the temperature controlled stage based on the Peltier element]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1 (78), pp. 55–74. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74.
2. Egorova I.P., Ivanov Yu.I., Kolesnikov S.N., Sidorov G.I. Poluprovodnikovyi termostat dlya laboratornykh issledovaniy "TC-20" [Semiconductor thermostat for laboratory researches "TC-20"]. *Izvestiya TRTU = Izvestiya TSURE*, 2002, no. 6 (29), pp. 121–123.
3. Seroklinov G.V., Gun'ko A.V. [Information technology for research biological potential changing by temperature affect]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2014)* [12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)-34006 proceedings], Novosibirsk, October 2–4, 2014, vol. 7, pp. 72–75. (In Russian).
4. Seroklinov G.V. Zadachi avtomatizatsii eksperimental'nykh issledovaniy slozhnykh biofizicheskikh ob"ektov [Tasks of automation experimental researching of complex biophysical objects]. *Metody i tekhnicheskie sredstva issledovaniy fizicheskikh protsessov v sel'skom khozyaistve* [Methods and technical facilities of researching of physical processes in agriculture]. Novosibirsk, 2001, pp. 46–53.
5. Magomedov D.A., Khazamova L.A., Mispakhov I.Sh. Malogabaritnyi termostat dlya perevozki biomaterialov [Small-size thermostat for transportation of biological materials]. *Nizkotemperaturnye i pishchevye tekhnologii v XXI veke* [Low-temperature and food technologies in XXI century]. St. Petersburg, 2015, pp. 458–460.
6. Parfenov A. Temperaturnyi profil' konveksionnoi paiki. Chto eto takoe? [Thermal profile of convection soldering. What is it?]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti = Technologies in Electronic Industry*, 2009, no. 2 (30), pp. 29–30.
7. Bezrukov N.S., Odireev A.N., Kilimichenko K.F., Perelman J.M. [Heating table for microscope based on the Peltier element]. *Sistemnyi analiz v meditsine (SAM 2017): materialy XI mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [System analysis in medicine (SAM 2017): Proceedings of XI International Scientific Conference], Blagoveshchensk, October 19–20, 2017, pp. 47–52. (In Russian).

8. Tarukin E.M. Avtofrizheratory [Refrigerators for car]. *Vestnik NGIEI = Herald NGIEI*, 2012, no. 6 (13), pp. 68–82.
9. Epaneshnikov V.D., Epaneshnikova I.V. Model' strukturnoi identifikatsii nepreryvnykh dinamicheskikh ob"ektov [Model of structural identification by diffraction analysis of continuous dynamic objects]. *Informatika i sistemy upravleniya = Information Science and Control Systems*, 2017, no. 1 (51), pp. 53–63. DOI: 10.22250/isu.2017.51.53-63.
10. Raskina A.V. Opredelenie struktury lineinogo dinamicheskogo ob"ekta v zadachakh neparаметрической identifikatsii [Determination of the structure of linear dynamic objects in non-parametric identification problems]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva = Vestnik SibGAU*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 891–898.
11. Chikil'din G.P., Maevskii I.V. Algoritm opredeleniya chastoty regularizatsii v MNK identifikatsii impul'snoi i chastotnykh kharakteristik [The algorithm of determination regularization frequency in the LSM for the impulse response identification and frequency response identification]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya = Automatics & Software Engineering*, 2018, no. 3 (25), pp. 62–68.
12. Strizhnev A.G., Markov A.V., Rusakovich A.N. Identifikatsiya ob"ekta upravleniya po perekhodnoi kharakteristike zamknutoi sistemy [Control object identification using closed-loop system transient response]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki = Doklady BGUIR*, 2012, no. 5 (67), pp. 65–72.
13. Averkin A.N., Povidalo I.S. Identifikatsiya dinamicheskikh ob"ektov s pomoshch'yu neuronnykh setei na osnove samoorganizuyushchikhsya kart Kokhonena [Dynamic object identification with som-based neural networks *Sistemnyi analiz v nauke i obrazovanii = System analysis in science and education*, 2012, no. 2, pp. 1–9.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Гринкевич Владимир Анатольевич – родился в 1994 году, научный сотрудник СибФТИ СФНЦА РАН. Область научных интересов: системы управления и их применение. Опубликовано 11 научных работ. (Адрес: 630501, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, Краснообск, СФНЦА РАН а/я 463. Email: grinkevich-vova@mail.ru).

Grinkevich Vladimir Anatol'yeovich (b. 1994) – researcher, SibFTI SFSCA RAS. His research interests are currently focused on control systems and their application. He is the author of 11 scientific papers. (Address: PO Box 463, SFSCA RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk district, Novosibirsk oblast, 630501, Russia. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru).

Статья поступила 09 июня 2020 г.
Received June 09, 2020

To Reference:

Grinkevich V.A. Identifikatsiya ustroystva na osnove elementa Pel'te metodom naimen'shikh kvadratov [The identification of a device based on a Peltier element by the least squares method]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 17–27. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27.

УДК: 621.396.01

**ДВУМЕРНАЯ ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА****А.В. Киселев, Т.И. Сабитов, М.А. Степанов***Новосибирский государственный технический университет*

В работе рассмотрена возможность замещения двумерного распределенного объекта четырехточечной частично когерентной моделью. В качестве критерия адекватности модели выбрано совпадение функций распределения шумов угловых координат для модели и замещаемого объекта. Показано, что предложенная четырехточечная конфигурация может быть представлена как две ортогональные эквивалентные двухточечные модели. Получены соотношения, связывающие параметры сигналов эквивалентных моделей с параметрами сигналов четырехточечной конфигурации. Под этими параметрами подразумеваются отношения мощностей сигналов и коэффициенты корреляционной матрицы. Показано, что для задаваемых параметров совместного распределения азимутальных и угломестных шумов могут быть рассчитаны параметры сигналов эквивалентных двухточечных моделей. Эти параметры используются для получения значений мощностей и коэффициентов корреляционной матрицы двумерной четырехточечной модели. Осуществлена апробация полученных результатов с помощью численных экспериментов для задаваемых тестовых значений параметров функции распределения угловых шумов. Формирование отсчетов сигналов, корреляционная матрица которых имеет требуемый вид, осуществлялось с помощью корреляционного метода линейного преобразования. Оценки параметров функции распределения выборки, полученной с помощью пеленгационного соотношения, получены методом моментов. Результаты численных экспериментов подтверждают достоверность полученных соотношений. Они могут быть использованы при математическом и имитационном моделировании распределенных радиолокационных объектов.

Ключевые слова: распределенный объект, шумы угловых координат, функция распределения, моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-28-36

Введение

В настоящее время лабораторные испытания радиолокационных станций (РЛС) осуществляются с помощью матричных имитаторов [1, 2]. Они предоставляют возможности имитации электромагнитных полей на апертуре антенны РЛС, соответствующих отражениям сигналов от различных целей. Перемещение имитируемой цели осуществляется электронным способом. При этом имитаторы позволяют учитывать амплитудные и доплеровские флуктуации, временное рассеяние, а также угловые шумы (УШ) протяженных объектов.

Явление УШ имеет место при зондировании распределенных объектов и может быть объяснено на основе их многоточечной модели. Близко расположенные элементарные отражающие элементы объекта дают излучение светящейся точки. Этот сигнал имеет нормальное распределение мгновенных значений. Распределенный объект представляется в виде совокупности светящихся точек и при анализе замещается соответствующей многоточечной моделью. Количество точек модели может варьироваться от нескольких десятков до нескольких тысяч. Неразрешаемые антенной РЛС светящиеся точки наблюдаются как кажущийся центр излучения (КЦИ). Координаты КЦИ принимаются в качестве оценки местоположения объекта. Флуктуации фазового фронта, вызванные флуктуациями сигналов

светящихся точек (например, в результате взаимного движения объекта и РЛС), приводят к блужданиям КЦИ, которые и представляют собой УШ [3].

Функция распределения (ПРВ) УШ [3]:

$$W(\xi) = \mu \sqrt{2 \left(1 + \mu^2 (\xi - m)^2\right)^{3/2}}, \quad (1)$$

где m – математическое ожидание блужданий КЦИ; μ – параметр, от которого зависит ширина распределения; ξ – обобщенная угловая координата (например, азимут или угол места), определяемая как отношение тангенса угла отклонения КЦИ от геометрического центра объекта к половине углового размера объекта.

Параметры m и μ распределения (1) характеризуют угловое положение объекта и его угловой размер соответственно.

Для имитации отражений от радиолокационных объектов используют малоточечные геометрические модели, где точка модели соответствует излучателю матричного имитатора. Замещение сложной многоточечной структуры происходит за счет распределения мощностей между излучателями сигналов [1, 2].

Ранее авторами работы была рассмотрена возможность замещения одномерного распределенного объекта двухточечной частично когерентной моделью [4]. Излучаемые сигналы – коррелированные случайные нормальные процессы. Были получены соотношения для расчета параметров излучаемых сигналов при заданных параметрах плотности распределения вероятности (ПРВ) моделируемых УШ.

Соотношения для расчета параметров сигналов двухточечной модели [4]:

$$\gamma = \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{-2m\mu^2}{1 + m^2\mu^2 + \mu^2} \right) \right], \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\mu^2 - 1 - m^2\mu^2}{(1 + m^2\mu^2 + \mu^2) \sqrt{1 - \left(\frac{-2m\mu^2}{1 + m^2\mu^2 + \mu^2} \right)^2}}, \quad (3)$$

где γ^2 – отношение мощностей сигналов; ρ – коэффициент взаимной корреляции сигналов.

В данной работе авторами предлагается развить ранее полученные результаты для двумерного частично когерентного моделирования УШ. Цель работы – получить соотношения для расчета параметров сигналов двумерной частично когерентной модели, обеспечивающей адекватное замещение распределенного объекта.

1. Теория

Адекватная двумерная модель должна обеспечивать равенство параметров двумерной функции распределения моделируемых УШ с соответствующими параметрами для замещаемого объекта. Совместная ПРВ азимутальных и угломестных шумов имеет вид [3]

$$W(\xi_x, \xi_y) = \frac{\mu_x \mu_y}{\pi \left(1 + \mu_x^2 (\xi_x - m_x)^2 + \mu_y^2 (\xi_y - m_y)^2\right)^2}, \quad (4)$$

где m_i , μ_i и ξ_i имеют тот же смысл, что и для одномерного распределения (1).

Рассмотрим конфигурацию из четырех излучателей коррелированных случайных сигналов (рис. 1). Излучатели модели расположены в одной плоскости в углах прямоугольника. Координаты излучателей в декартовой системе координат: $(x_1, y_1) = (1, 1)$, $(x_2, y_2) = (-1, 1)$, $(x_3, y_3) = (1, -1)$, $(x_4, y_4) = (-1, -1)$.

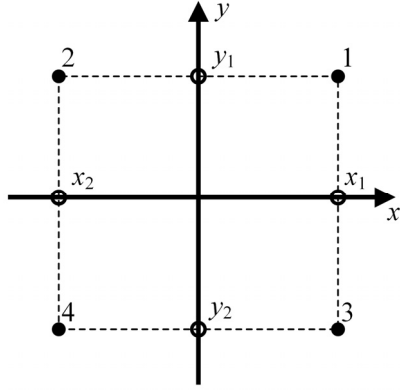


Рис. 1 – Четырехточечная двумерная частично когерентная модель распределенного объекта

Fig. 1. A four-point two-dimensional partially coherent model of a distributed object

Проекции излучающих точек на два взаимно ортогональных направления обобщенной координаты ξ (направления, совпадающие с осью OX и осью OY соответственно) образуют двухточечные модели-проекции. Параметры моделей-проекций следующие.

Модель, ориентированная по оси OX :

$$\begin{cases} \sigma_{x1}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\rho_{13}\sigma_1\sigma_3, \\ \sigma_{x2}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_{24}\sigma_2\sigma_4. \end{cases} \quad (5)$$

Модель, ориентированная по оси OY :

$$\begin{cases} \sigma_{y1}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\rho_{12}\sigma_1\sigma_2, \\ \sigma_{y2}^2 = \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_{34}\sigma_3\sigma_4. \end{cases} \quad (6)$$

где ρ_{ij} – коэффициент взаимной корреляции сигналов, излучаемых из i -й и j -й точек модели.

Синтез двухточечных моделей-проекций (расчет дисперсий излучаемых сигналов σ_{x1}^2 , σ_{x2}^2 , σ_{y1}^2 и σ_{y2}^2 и коэффициентов взаимной корреляции ρ_x и ρ_y) можно проводить по соотношениям (2) и (3). В соответствии с (5) и (6) сигналы излучающих точек моделей-проекций – это сумма сигналов двух реальных точек.

Коэффициенты взаимной корреляции сигналов излучателей, формирующих излучение двухточечной модели-проекции, можно положить равными друг другу и определить следующим образом:

$$\rho_{12} = \rho_{34} = \rho_x, \quad \rho_{13} = \rho_{24} = \rho_y, \quad (7)$$

где ρ_x и ρ_y – коэффициенты взаимной корреляции сигналов двухточечных моделей-проекций.

Аналогичным образом можно обозначить отношение среднеквадратичных отклонений (СКО) двухточечных моделей:

$$\gamma_x = \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_{x2}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sigma_3}{\sigma_4}, \quad \gamma_y = \frac{\sigma_{y1}}{\sigma_{y2}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_2}{\sigma_4}. \quad (8)$$

Допущения в виде соотношений (7) и (8) не являются противоречивыми и позволяют значительно упростить расчет параметров сигналов. Покажем справедливость записанных равенств.

Рассмотрим горизонтально ориентированную двухточечную модель-проекцию. В соответствии с (5) отношение СКО сигналов:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{x1}^2}{\sigma_{x2}^2} &= \frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\rho_{13}\sigma_1\sigma_3}{\sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_{24}\sigma_2\sigma_4} = \frac{\sigma_3^2 \left(\sigma_1^2 / \sigma_3^2 + 1 + 2\rho_{13}\sigma_1 / \sigma_3 \right)}{\sigma_4^2 \left(\sigma_2^2 / \sigma_4^2 + 1 + 2\rho_{24}\sigma_2 / \sigma_4 \right)} = \\ &= \left| \begin{array}{cc} \sigma_1 & \sigma_2 \\ \sigma_3 & \sigma_4 \\ \rho_{13} & \rho_{24} \end{array} \right| = \frac{\sigma_3^2}{\sigma_4^2} = \gamma_x^2. \end{aligned}$$

Полученное равенство верно с учетом (7) и (8). Запишем теперь выражение для коэффициента корреляции и произведем преобразования, учитывая (7) и (8):

$$\begin{aligned} \frac{M[S_{x1}S_{x2}]}{\sigma_{x1}\sigma_{x2}} &= \frac{M[(S_1 + S_3)(S_2 + S_4)]}{\sigma_{x1}\sigma_{x2}} = \\ &= \frac{\rho_x\sigma_1\sigma_2 + \rho_x\rho_y\sigma_1\sigma_4 + \rho_x\rho_y\sigma_3\sigma_2 + \rho_x\sigma_3\sigma_4}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\rho_y\sigma_1\sigma_3} \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_y\sigma_2\sigma_4}} = \\ &= \rho_x \frac{\sigma_1\sigma_2 + \rho_y\sigma_1\sigma_4 + \rho_y\sigma_3\sigma_2 + \sigma_3\sigma_4}{\frac{\sigma_1}{\sigma_2}(\sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_y\sigma_2\sigma_4)} = \\ &= \rho_x \frac{\sigma_1\sigma_2 + 2\rho_y\sigma_1\sigma_4 + \sigma_3\sigma_4}{\sigma_1\sigma_2 + \sigma_3\sigma_4 + 2\rho_y\sigma_1\sigma_4} = \rho_x. \end{aligned}$$

Выражение для коэффициента корреляции также верно. Аналогичные выкладки можно привести и для вертикально ориентированной модели-проекции. Делаем вывод о допустимости использования (7) и (8).

Выражения (5)–(8) позволяют найти соотношения для расчета СКО сигналов излучателей четырехточечной двумерной модели для обеспечения требуемых параметров ПРВ моделируемых УШ:

$$\sigma_1 = \gamma_y \sqrt{\frac{\sigma_{x1}^2}{\gamma_y^2 + 1 + 2\rho_y\gamma_y}}, \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{\gamma_x}, \quad \sigma_3 = \frac{\sigma_1}{\gamma_y}, \quad \sigma_4 = \frac{\sigma_1}{\gamma_x\gamma_y}. \quad (9)$$

2. Апробация результатов

Апробация результатов осуществлялась с помощью численных экспериментов. Задавались тестовые значения параметров ПРВ моделируемых УШ.

По задаваемым параметрам ПРВ УШ производился расчет коэффициентов корреляции и СКО излучаемых сигналов по соотношениям (2), (3) и (9).

Сперва формировались отсчеты четырех не коррелированных реализаций комплексного случайного процесса $\dot{n}_k(t) = i_k(t) + jq_k(t)$, где k – порядковый номер реализации; $i(t)$ и $q(t)$ – нормальные случайные процессы с нулевым мат. ожиданием и единичной дисперсией; t – порядковый номер отсчета.

Для получения отсчетов реализаций с требуемыми значениями коэффициентов взаимной корреляции использовался корреляционный метод линейного преобразования [5]:

$$\dot{y}(t) = A \cdot \dot{n}(t).$$

Переходная матрица имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix},$$

где элементы матрицы [5]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1, & a_{21} &= \rho_{21}, & a_{22} &= \sqrt{\rho_{22} - a_{21}^2}, & a_{31} &= \rho_{31}, & a_{32} &= \frac{\rho_{32} - a_{21}a_{31}}{a_{22}}, \\ a_{33} &= \sqrt{\rho_{33} - a_{31}^2 - a_{32}^2}, & a_{41} &= \rho_{41}, & a_{42} &= \frac{\rho_{42} - a_{21}a_{41}}{a_{22}}, & a_{43} &= \frac{\rho_{43} - a_{31}a_{41} - a_{32}a_{42}}{a_{33}}, \\ a_{44} &= \sqrt{\rho_{44} - a_{41}^2 - a_{42}^2 - a_{43}^2}. \end{aligned}$$

Полученные реализации с заданными взаимными коэффициентами корреляции использовались для получения отсчетов комплексной амплитуды сигнала, излучаемого из k -й точки модели по соотношению

$$\dot{S}_k(t) = \sigma_k \dot{y}_k(t).$$

Положение точки КЦИ определялось с помощью соотношения для моноимпульсной пеленгации [6]:

$$F(t) = \operatorname{Re} \left(\frac{\Delta(t)}{\Sigma(t)} \right),$$

где $\Delta(t)$ – отсчет сигнала, принятого моделью разностной диаграммы направленности пеленгатора; $\Sigma(t)$ – отсчет сигнала, принятого моделью суммарной диаграммы направленности пеленгатора.

Оценка параметров функции распределения моделируемых УШ осуществлялась по соотношениям [3, 7]:

$$m' = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N F(t), \quad \mu' = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |F(t) - m'|}.$$

Результаты моделирования (100 тыс. отсчетов для одной реализации) сведены в таблицу (табл. 1). Для эксперимента № 1 из табл. 1 представлены графики требуемой ПРВ и гистограмма моделируемых флуктуаций КЦИ, полученная в результате усреднения по 20 реализациям (рис. 2 и 3).

Таблица 1 / Table 1

Результаты численных экспериментов
Results of numerical experiments

№	Задаваемые параметры ПРВ УШ				Оценки параметров ПРВ моделируемых УШ			
	m_x	μ_x	m_y	μ_y	m'_x	μ'_x	m'_y	μ'_y
1	0,5	2	0	1	0,498	2,012	0,016	0,992
2	-0,2	0,7	0,4	1	-0,21	0,703	0,406	1,006
3	-0,5	4	-0,6	2,7	-0,499	4,014	-0,6	2,684
	Параметры модели							
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	ρ_x	ρ_y		
1	1,581	0,707	1,581	0,707	0,447	0		
2	0,755	0,86	0,512	0,583	-0,354	-0,08		
3	0,1	0,273	0,302	0,821	0,808	0,562		

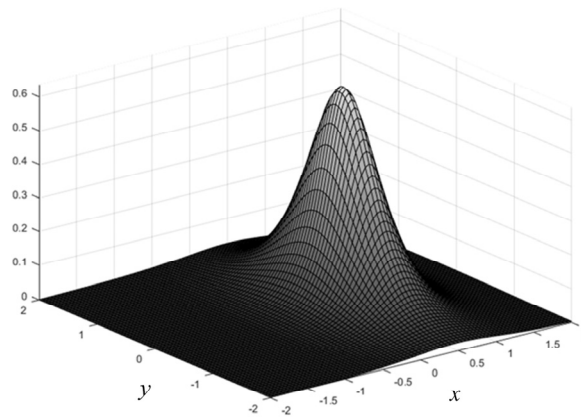


Рис. 2 – Задаваемая ПРВ УШ

Fig. 2 – The required distribution function of an angle noise

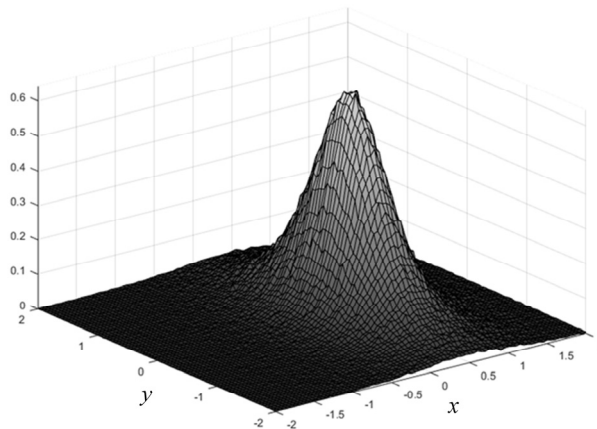


Рис. 3 – Гистограмма флуктуаций КЦИ

Fig. 3 – The histogram of fluctuations of the apparent radiation center

Как видно из таблицы и рисунков, полученные в результате численных экспериментов оценки параметров ПРВ УШ соответствуют задаваемым величинам, что указывает на достоверность полученных результатов.

Заключение

Данная работа является развитием ранее полученных результатов для одномерной двухточечной частично когерентной модели. Результат работы – соотношения для расчета параметров сигналов четырехточечной двумерной частично когерентной модели. Достоверность полученных соотношений была подтверждена с помощью численных экспериментов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки геометрических моделей распределенных радиолокационных объектов при математическом или имитационном моделировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation / L. Hua, Z. Jianjiang, P. Minghai, Z. Hanwu // *Future Communication, Computing, Control and Management*. – 2012. – Vol. 2. – P. 125–134.
2. **Киселев А.В., Тырыкин С.В.** Малоточечная модель фрагмента неоднородной поверхности Земли // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2016. – Вып. 4. – С. 32–40.
3. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
4. **Сабитов Т.И., Киселев А.В., Степанов М.А.** Модель распределенного радиолокационного объекта, составленного из излучателей коррелированных сигналов // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2017. – Вып. 4. – С. 40–43.
5. **Быков В.В.** Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М.: Советское радио, 1971. – 328 с.
6. **Канащенков А.И., Меркулов В.И.** Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.
7. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

A TWO-DIMENSIONAL PARTIALLY COHERENT GEOMETRIC MODEL OF A DISTRIBUTED RADAR OBJECT

Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The possibility of the substitution of a two-dimensional distributed radar object by a 4-point partly coherent model is considered. As a criterion of adequacy we accepted the coincidence of the angle noise distribution function for the model and the substituted object. It is shown that the proposed four-point configuration can be represented as two orthogonal equivalent two-point models. Relations are obtained for calculating the parameters (power ratios of the signals and coefficients of the correlation matrix) of the signals of the four-point model through the parameters of the signals of the equivalent two-point models. The signal parameters of the equivalent two-point models can be calculated for the given parameters of the joint distribution of azimuthal and elevation noises. These relations obtained for the two-dimensional model are the result of this work. The results obtained were tested using numerical experiments for the test values of the parameters of the angle noise distribution function. To generate samples of signals whose correlation matrix has the required form the linear transformation method was used. The parameters of the distribution function of the simulated angle noise were estimated by the method of matching

moments. The results of numerical experiments confirm the reliability of the obtained ratios. They can be used in mathematical and simulation modeling of distributed radar objects.

Keywords: distributed object, angle noise, distribution function, simulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-28-36

REFERENCES

1. Hua L., Jianjiang Z., Minghai P., Hanwu Z. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation. *Future Communication, Computing, Control and Management*, 2012, vol. 2, pp. 125–134. DOI: 10.1007/978-3-642-27314-8_18.
2. Kiselev A.V., Tyrykin S.V. Malotochehnaya model' fragmenta neodnorodnoi poverkhnosti Zemli [Small quantity point model of non-uniform earth surface fragment]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2016, no. 4, pp. 32–40.
3. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended radar targets]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
4. Sabitov T.I., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Model' raspredelennogo radiolokatsionnogo ob"ekta, sostavlenno iz izluchatelei korrelirovannykh signalov [Model of distributed radar object composed of emitters correlated signals]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2017, iss. 4, pp. 40–43.
5. Bykov V.V. *Tsifrovoye modelirovanie v statisticheskoi radiotekhnike* [Digital modeling in statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 328 p.
6. Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I. *Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktional'nykh samoletov. T. 1. RLS – informatsionnaya osnova boevykh deistvii mnogofunktional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [Radar systems multipurpose aircraft. Vol. 1. Radar – information basis hostilities multipurpose aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 656 p.
7. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Киселев Алексей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование сложной радиолокационной обстановки в реальном масштабе времени. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Kiselev Aleksey Vasil'evich Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests include real-time modeling of complex radar conditions. Over 150 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nil_rtu@ngs.ru).



Сабитов Тимур Ильясович – магистрант, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: радиолокация, имитационное моделирование. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sti0@mail.ru).

Sabitov Timur Ilyasovich – an undergraduate student, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on radiolocation, simulation modelling. He is the author of 6 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sti0@mail.ru).



Степанов Максим Андреевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование сложной радиолокационной обстановки в реальном масштабе времени. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich, Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor at the Department of Radio Receivers and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests include real-time modeling of complex radar conditions. He has published over 80 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 12 февраля 2020 г.

Received February 12, 2020

To Reference:

Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A. Dvumernaya chastichno kogerentnaya geometricheskaya model' raspredelennogo radiolokatsionnogo ob'ekta [A two-dimensional partially coherent geometric model of a distributed radar object]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 28–36 . DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-28-36.

УДК62-835:621.313.3

ВЫСОКОДИНАМИЧНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**А. А. Кромм¹, Г.М. Симаков², С.С. Жук²**¹*Linde Material Handling GmbH, Ашаффенбург, Германия*²*Новосибирский государственный технический университет*

Статья посвящена проблеме разработки высокودинамичного наблюдателя потока трехфазного вентильного индукторного двигателя, или коротко индукторного двигателя. Синтез наблюдателя потока базируется на анализе мгновенных мощностей статора двигателя в системах векторного управления индукторных двигателей. В алгоритме наблюдателя отсутствуют интегральные, дифференциальные и итерационные методы математики. Предложенный алгоритм наблюдателя реализован в векторно-матричной форме для современных систем управления электрических приводов. Наблюдатель обеспечивает стабильность и высокую прецизионность в приводах с прямым управлением момента, в которых вариации угла пространственного вектора напряжения инвертора значительно выше, чем в приводах с широтно-импульсной модуляцией. Предложенный алгоритм наблюдателя не требует «эксклюзивных» ресурсов микропроцессорных блоков управления. В работе приведен алгоритм инвариантного по времени наблюдателя, обеспечивающего высокую точность наблюдаемого потока при малых индуктивностях и низких напряжениях индукторного двигателя. Проведен анализ кривых измеренного и наблюдаемого момента индукторного двигателя во время разгона привода.

Ключевые слова: наблюдатель потока двигателя, прямое управление моментом, баланс мощностей, пространство состояний, отсутствие итерационных методов, высокая точность наблюдателя, кривые наблюдаемого момента.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-37-44

Введение

Перспективы внедрения индукторных двигателей в глубокорегулируемых электроприводах, по мнению многих специалистов, практически неограниченны. Импульс такому оптимизму дает ряд уникальных свойств индукторного двигателя, как например, высокая перегрузочная способность, простота конструкции магнитопроводов ротора, высокие динамические свойства привода за счет малой инерционности безобмоточного ротора [1, 2]. Прецизионная точность воспроизведения заданного момента двигателя в широком диапазоне температур и механических воздействий в сочетании с низкой ценой делает его незаменимым, например, в приводах электрических погрузчиков, где профили динамики привода характеризуются высокими градиентами момента двигателя.

В подтверждение к сказанному один небольшой пример: три европейские фирмы, производящие погрузчики премиум класса в общей сложности более шестидесяти тысяч машин в год, с 2022 года предполагают отказаться от использования асинхронных двигателей из-за высокой стоимости «беличьей клетки» ротора [3]. (Высокая цена синхронных двигателей в производстве и недостаточная точность воспроизведения заданного момента двигателя в широком диапазоне температур ограничивают его применение.)

В общем случае, переход к разработке электрического привода с индукторными двигателями (ИД), в статоре которых уложена классическая трехфазная

обмотка, не вызывает больших проблем, за исключением, пожалуй, методов и способов идентификации магнитного состояния электрической машины. Так как электромагнитный поток ИД является функцией тока статора и угла поворота ротора, градиенты его изменения велики, что, в свою очередь, требует применения быстродействующих наблюдателей. Классические наблюдатели, использующие, например, интегральные оценки разницы подводимого напряжения статора и падения напряжения на сопротивлении статорной цепи, недостаточно динамичны. В технической литературе можно найти материалы по анализу и синтезу динамических наблюдателей потока двигателя, которые преимущественно базируются на итерационных методах математики, в предположении об обеспечении желаемой точности метода за конечное время вычисления микропроцессорных устройств [4, 5]. При превышении отведенного для идентификации времени, которое, в первую очередь, определяется мощностью процессора, прецизионность наблюдаемого потока становится недостаточной. Для повышения точности оценки потока, например, в [6] предлагается адаптивный метод, основанный на многомодельном расширенном фильтре Калмана с иерархическим переходом от модели к модели. Повышенная точность результата получается путем «смешивания» выходных данных разных моделей с разными весовыми коэффициентами.

Не углубляясь в детальное описание достоинств и недостатков вышеуказанных наблюдателей, следует отметить два основных недостатка, ограничивающих их применение в массовом производстве: сложность алгоритма и соответственно программного обеспечения микропроцессорных устройств, а также трудоемкость оптимизации времени итерационного процесса или весовых коэффициентов. Устранить указанные недостатки позволяет методика оценки потока, которая будет приведена ниже.

1. Постановка задачи

Целью работы является синтез высокودинамичного наблюдателя магнитного состояния индукторного двигателя (НМСД) на базе анализа мощностей двигателя. В алгоритме для повышения динамической точности наблюдателя используются исключительно алгебраические уравнения. Простота и «прозрачность» данного метода ставят целью сократить время разработки, анализа и синтеза высокودинамичных приводов с индукторными двигателями.

Постановка задачи определяет основные требования к разработке привода и наблюдателя:

- математическое описание контуров статорной обмотки двигателя общепринятое, как в неподвижных, так и во вращающихся координатах;
- алгоритм оценки потока должен учитывать отсутствие потерь в роторе ИД (достоинство ИД, которое обеспечивает успех этого типа двигателя на рынке);
- приоритетным алгоритмом управления двигателем является прямое управление моментом (англ.: Direct Torque Control (DTC)), так как указанный способ обеспечивает максимальную динамику привода [7];
- алгоритм наблюдателя не должен содержать интегралы и производные сигналов. Первые ухудшают динамические свойства, особенно при малых частотах вращения двигателя [8], вторые нарушают прецизионность наблюдателя вследствие ограниченной помехозащищенности электрической части привода [9];
- алгоритм наблюдателя должен реализовываться в векторно-матричной форме для успешной интеграции НМСД в системы векторного управления двигателя;
- синтез НМСД должен осуществляться в оптимизированных по стоимости микропроцессорных устройствах, не обладающих «сверхресурсами».

2. Синтез наблюдателя

Разработка алгоритма идентификации магнитного состояния машины базируется на анализе баланса мгновенных мощностей двигателя, основой которого, в свою очередь, является закон сохранения энергии. Запасенную энергию в фазе двигателя целесообразно оценить через классическое уравнение равновесия напряжений статорной цепи ИД во вращающейся синхронно с ротором (индекс «г») системе координат [8]:

$$U_s^r = I_s^r R_s + L_s \frac{dI_s^r}{dt} + j\omega_r \psi_s^r, \quad \text{причем} \quad \omega_r = \frac{d\phi_r}{dt}, \quad (1)$$

где I_s, L_s, ψ_s, U_s – ток, индуктивность, поток и напряжение статора двигателя; R_s – омическое сопротивление статорной обмотки двигателя; ω_r, ϕ_r – угловая скорость и угол поворота ротора двигателя.

Умножив каждый член уравнения (1) на $I_s^r \Delta t$ и опустив, для простоты чтения индекс «г», получим следующее уравнение для энергий:

$$U_s I_s \Delta t = I_s^2 R_s \Delta t + \psi_s \Delta I_s + j I_s \psi_s \Delta \phi, \quad (2)$$

где Δt – некоторый конечный интервал времени.

Записав (2) в обобщенном виде, получим

$$E_s = \Delta E_s(I_s, R_s) + E_m(I_s, \psi_s) + E_{em}(I_s, \psi_s, \Delta \phi), \quad (3)$$

где E_s – полная энергия, подводимая к двигателю; ΔE_s – потери энергии на активном сопротивлении статора двигателя; E_m – магнитная энергия двигателя согласно определению энергии: $W_0 = \int_0^\psi i d\psi$ [10]; E_{em} – энергия электромеханического преобразователя, затраченная на формирование вращающего момента двигателя, согласно определению коэнергии: $W_0^* = \int_0^i \psi di$ [10].

Баланс энергий (3) позволяет определить полную, активную и реактивную мощности в двигателе, с учетом допущения отсутствия потерь в роторе ИД. (Замечание: данное допущение для ИД с полнотельным шихтованным ротором не является грубым в сравнении, например, с асинхронным двигателем, в роторе которого реализована «беличья клетка»).

Реактивную мощность (Q) легко выделить из магнитной энергии E_m :

$$Q = I_s L_s \frac{dI_s}{dt} = I_s \frac{d\psi_s}{dt} = I_s \omega \frac{d\psi_s}{d\phi} = \mathbf{I}_s^T \omega \mathbf{D} \psi_s = \mathbf{I}_s^T \mathbf{D} \mathbf{U}_s, \quad (4)$$

причем $\mathbf{I}_s, \psi_s, \mathbf{U}_s$ – вектор тока, потока и напряжения двигателя; $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – классическая матрица преобразования, позволяющая перейти к инвариантной по времени системе, записанной в векторно-матричной форме, а также позволяющая

записать реактивную мощность через векторное произведение векторов тока напряжения статора.

С учетом скалярной и векторно-матричной формы записи активной мощности фазы двигателя можно представить в следующем виде:

$$P = R_s I_s^2 + I_s \omega \psi_s = I_s (R_s I_s + \omega \psi_s) \hat{=} \mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s. \quad (5)$$

Компоненты наблюдаемого вектора магнитного потока двигателя $\hat{\Psi}_s$ в скалярной форме определяются из (4, 5) по нижеприведенному выражению:

$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{bmatrix} \hat{=} \begin{bmatrix} \text{Im}(\psi_s) \\ \text{Re}(\psi_s) \end{bmatrix} = (I_s \omega_e)^{-1} \begin{bmatrix} Q \\ P - R_s I_s^2 \end{bmatrix}$$

или в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{bmatrix} = [(\mathbf{I}_s^T \mathbf{I}_s)^{\frac{1}{2}} \omega_e]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s^T \mathbf{D} \mathbf{U}_s \\ \mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s - \mathbf{I}_s^T \mathbf{R} \mathbf{I}_s \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где d, q – индекс продольной и поперечной осей вращающейся системы координат; ω_e – угловая скорость вращающейся системы координат; $\mathbf{R} = \text{diag}(r_d(t^\circ), r_q(t^\circ))$ – матрица сопротивлений обмотки статора во вращающейся системе координат с учетом влияния температурного фактора на омическое сопротивление.

Реализация алгоритма (6) не представляет большого труда на практике. Следует, однако, отметить, что в некоторых случаях для повышения точности формирования вектора потока при малых напряжениях статора или малой индуктивности обмотки статора двигателя целесообразней воспользоваться следующим выражением:

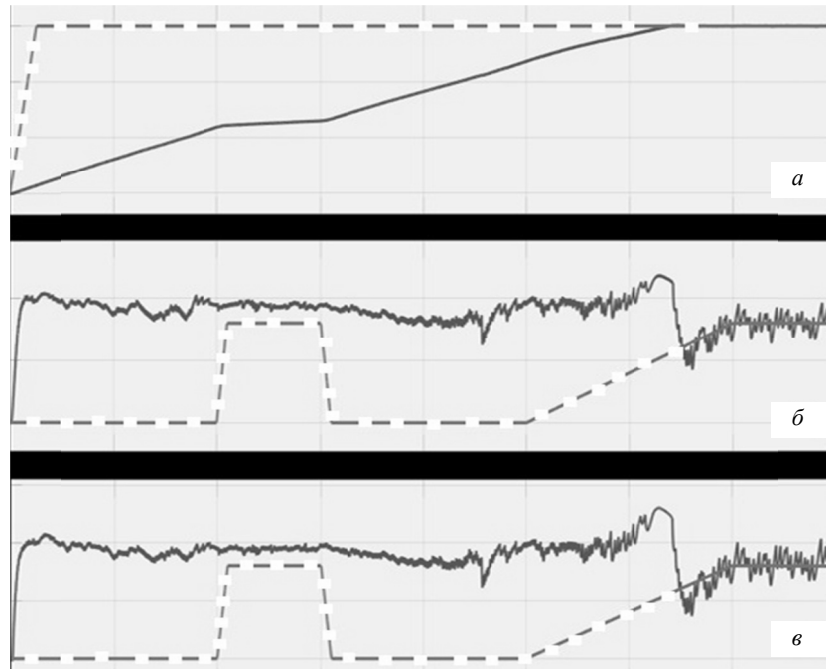
$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{bmatrix} = \left[\omega_e (\mathbf{I}_s^T \mathbf{I}_s)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \begin{bmatrix} [(\mathbf{I}_s^T \mathbf{I}_s)(\mathbf{U}_s^T \mathbf{U}_s) - (\mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s)(\mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s)]^{\frac{1}{2}} \\ \mathbf{I}_s^T \mathbf{U}_s - \mathbf{I}_s^T \mathbf{R} \mathbf{I}_s \end{bmatrix},$$

в котором реактивная мощность рассчитывается через полную и активную мощность.

Модуль вектора потока статора двигателя целесообразно записать, и соответственно рассчитывать, в классической форме, а именно:

$$|\hat{\Psi}_s| = \left(\hat{\Psi}_s^T \hat{\Psi}_s \right)^{\frac{1}{2}}.$$

По результатам анализа и синтеза НМСД была проведена разработка программного обеспечения наблюдателя на базе оптимизированного по стоимости 16-битного процессора. Результаты имплементации разработанного наблюдателя в привод с ИД целесообразно оценить с помощью кривых, приведенных на рисунке.



Кривые заданной (пунктирная линия) и измеренной частоты вращения вала ИД (а), нагрузочного (пунктирная линия) и измеренного момента двигателя (б), нагрузочного (пунктирная линия) и наблюдаемого момента двигателя (в)

Curves of the set (dashed line) and measured shaft speed ID (а), load (dashed line) and measured motor torque (б), load (dashed line) and observed motor moment (в)

Замечание: наблюдаемый момент двигателя реализован через оценки потока наблюдателя и измеренного тока статора по следующей зависимости:

$$M = k(\psi_{sd}I_{sq} - \psi_{sq}I_{sd}),$$

где k – константа пропорциональности момента.

Сравнение кривых измеренного (б) и наблюдаемого (в) момента ИД свидетельствует о высокой точности и динамике наблюдателя. Высокочастотная составляющая в измеренном и наблюдаемом моменте двигателя объясняется высокими пульсациями питающего напряжения (тяговая батарея) и необходимостью формирования в приводах с ДТС исключительно фиксированных положений пространственного вектора напряжения преобразователя при варьируемой частоте коммутации его полупроводников. Варьируемая частота коммутации преобразователя является следствием применения релейных регуляторов в контурах потока и момента двигателя. Наблюдатель обеспечивает высокую стабильность и точность привода, несмотря на то что «разброс» угла вектора напряжения инвертора при ДТС значительно выше, чем в преобразователях с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Заключение

1. Идентификация потока статора двигателя осуществляется без применения итерационных, интегральных или дифференциальных методов математики. Точность идентификации НМСД в аспекте сказанного высока, так как не зависит от

времени как параметра. Алгоритм базируется исключительно на алгебраических выражениях, что позволяет быстро осуществить реализацию наблюдателя на практике.

2. Описанный алгоритм учитывает «автоматически» угловую скорость ротора, так как предложенная методика НМСД идентифицирует поток во вращающейся системе координат. Как следствие, НМСД обеспечивает точную оценку потока даже тогда, когда статор запитан, но ротор двигателя неподвижен.

3. Погрешность наблюдателя от неточности оценки омического сопротивления обмотки статора при нагреве ИД существенно ниже, чем в наблюдателях потока асинхронных двигателей, так как в наблюдателях последних требуется информация о температуре обмотки ротора. В оптимизированных по стоимости приводах прямое измерение температуры ротора недоступно. В приводе с индукторным двигателем необходимость измерения температуры ротора отпадает, а температура обмотки статора ИД доступна прямому измерению.

4. Предложенный алгоритм предпочтителен в оптимизированных по стоимости приводах, так как его программное обеспечение не требует «эксклюзивных» ресурсов блоков управления. Так, например, в микропроцессоре семейства XC22xx с тактовой частотой 100 МГц время вычисления предложенного алгоритма составляет не более 2 μ s, в случае реализации функции извлечения квадратного корня в табличной форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Александровский С.В., Петренко Ю.Н.** Анализ схем питания вентиляно-индукторных двигателей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 6. – С. 27–31.
2. **Бычков М.Г.** Вентиляно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития // Рынок электротехники. – 2007. – № 2. – С. 48–55.
3. **Reichel J.** [LogiMAT 2018: Jungheinrich automatisiert und elektrifiziert] // Logistra. – 2018. – N 1–2. – P. 12–14.
4. Patent DE 102012223441. Verfahren und System für sensorloses Steuern eines elektrischen Motors / Y.C. Son, L. Dunbar, S. Hiti. – Publ. Date 11.07.2013.
5. Patent DE 102009025390. Verfahren zur Regelung eines umrichter gespeisten Elektromotors und umrichter gespeister Elektromotor / W. Hammel, T. Schuster, H. Wolf, R. Kimmich, A. Kulesa. – Publ. date 14.01.2010.
6. Speed and flux observer of induction motor based on extended Kalman Filter and Markov Chain / Y. Zhonggang, L. Guoyin, Z. Yanqing, L. Jing, S. Xiangdong, Z. Yanru // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32, N 9. – P. 7096–7117. – DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623806.
7. **Schroeder D.** Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – P. 740–758. – DOI: 10.1007/978-3-540-89613.
8. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов. – М.: Академия, 2007. – 272 с.
9. **Балковой А.П., Цаценкин В.К.** Прецизионные электроприводы с вентильными двигателями // Электропривод с вентильными двигателями: доклады научно-практического семинара. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – С. 35–70.
10. **Crastan V.** Elektrische Energieversorgung 1. – Berlin: Springer-Verlag, 2015. – P. 52–54.

HIGHLY DYNAMIC OBSERVER OF THE MAGNETIC STATE ON THE BASIS OF THE VENTILED INDUCTOR MOTOR

Kromm A.A.¹, Simakov G.M.², Zhuk S.S.²

¹Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg, Germany

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article is devoted to the problem of developing highly dynamic flux observers for three-phase inductor motors. The synthesis of the flux observer is based on the analysis of the instantaneous powers of the motor stator by the vector control of drives. The observation algorithm lacks integral, differential and iterative methods of mathematics. The proposed observer algorithm is implemented in a vector-matrix form for its simplest integration into the modern vector control of electric drives. The observer provides stability and high precision in drives with direct torque control, in which the variation in the angle of the spatial voltage vector of the inverter is much higher than in drives with pulse width modulation. The proposed observer algorithm can be used in cost optimized drives, because its implementation does not require “exclusive” resources of microprocessor control units. The paper presents a time invariant observer algorithm that provides high precision of the observed flux at low inductances and low voltages of the inductor motor. The measured and observed moments of the reluctance motor during the acceleration of the drive were analyzed.

Keywords: flux observer of the inductor motor, direct torque control of the drive, identification based on power analysis, identification in a vector-matrix form, elimination of iterative methods of mathematics, high precision of non-rotating motor observation, presentation of the measured and observed moment.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-37-44

REFERENCES

1. Aleksandrovskii S.V., Petrenko Yu.N. Analiz skhem pitaniya ventil'no-induktornykh dvigatelei [Feeding system analysis of self-controlled inverter-bed inductor motors]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2010, no. 6, pp. 27–31.
2. Bychkov M.G. Ventil'no-induktorniye elektroprivod: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Valve-inductor electric drive: current state and development prospects]. *Rynok elektrotekhniki = Market of electrical engineering*, 2007, no. 2, pp. 48–55.
3. Reichel J. [LogiMAT 2018: Jungheinrich automatisiert und elektrifiziert]. *Logistra*, 2018, no. 1–2, pp. 12–14. (In Deutsch).
4. Son Y.C., Dunbar L., Hiti S. *Verfahren und System für sensorloses Steuern eines elektrischen Motors*. Patent DE, no. DE10201223441, 2013.
5. Hammel W., Schuster T., Wolf H., Kimmich R., Kulesa A. *Verfahren zur Regelung eines umrichtergespeisten Elektromotors und umrichtergespeister Elektromotor*. Patent DE, no. DE102009025390, 2010.
6. Zhonggang Y.A., Guoyin L., Yanqing Z., Jing L., Xiangdong S., Yanru Z. Speed and flux observer of induction motor based on extended Kalman Filter and Markov Chain. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 9, pp. 7096–7117. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623806.
7. Schroeder D. *Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen*. Berlin, Springer-Verlag, 2009, pp. 740–758. DOI: 10.1007/978-3-540-89613.
8. Sokolovskii G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Variable frequency AC drives]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 272 p.
9. Balkovoi A.P., Tsatsenkin V.K. Pretsizionnyi elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami [Precision electric drives with brushless motors]. *Elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami: doklady nauchno-prakticheskogo seminara* [Electric drive with valve motors: reports of the Scientific and Practical Seminar]. Moscow, MEI Publ., 2007, pp. 35–70.
10. Crastan V. *Elektrische Energieversorgung 1*. Berlin, Springer-Verlag, 2015, pp. 52–54.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



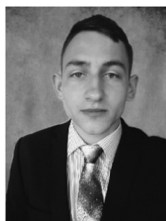
Кромм Андрей Артурович – родился в 1960 году, канд. техн. наук, инженер высшей квалификации в компании Linde Material Handling GmbH, Ашаффенбург, Германия. Является автором более 15 научных публикаций. (Адрес: 630099, Россия, г. Новосибирск, Депутатская 60/39. E-mail: galand@gmx.net).

Kromm Andrej Arturovich (b. 1960) – Candidate of Sciences (Eng.), highly qualified engineer at Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg, Germany. He is the author of more than 15 scientific papers. (Address: 60/39, Deputatskaya Street, Novosibirsk, 630099, Russia. E-mail: galand@gmx.net).



Симаков Геннадий Михайлович – родился в 1942 году, д-р техн. наук, профессор кафедры ЭАПУ. Область научных интересов: автоматизация систем автоматизированного электропривода. Является автором более 150 научных публикаций (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Simakov44_86@mail.ru).

Simakov Gennady Mikhailovich (b. 1942) – D, Sc. (Eng.), professor in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automation of automated electric drive systems. He is the author of more than 150 scientific publications (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Simakov44_86@mail.ru).



Жук Сергей Сергеевич – родился в 1997 году, магистрант кафедры ЭАПУ. Область научных интересов: электропривод переменного тока. Опубликовано одна научная работа. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sergey.zhuk.97@mail.ru).

Zhuk Sergey Sergeevich (b. 1997) – a master student at the Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations in the Novosibirsk State Technical University. Research interests include AC electric drives. He has published one research paper. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sergey.zhuk.97@mail.ru).

Статья поступила 20 марта 2020 г.

Received March 20, 2020

To Reference:

Kromm A.A., Simakov G.M., Zhuk S.S. Vysokodinamichnyi nablyudatel' magnitnogo sostoyaniya na osnove ventil'nogo induktornogo dvigatelya [Highly dynamic observer of the magnetic state on the basis of the ventiled inductor motor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 37–44. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-37-44.

УДК 621.313.17

УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНОГО КПД ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.Ю. Нейман*Новосибирский государственный технический университет*

Для случая линейной среды установлена предпочтительность в режимах энергопреобразования, характеризующих процесс ускорения якоря электромагнитного двигателя из условия достижения предельных значений коэффициента полезного действия (КПД). В качестве объекта исследования рассматривается ненасыщенный электромагнитный двигатель, характеризующийся однократным процессом ускорения якоря, в магнитном поле, созданном индуктором. В результате проведенных исследований получены новые соотношения для анализа условий реализации предельных значений КПД, соответствующие режиму энергопреобразования и конфигурации элементарного магнитного цикла. Показано, что теоретически реализация режимов с КПД близких к 100 % возможна только при условии использования специальных средств автоматического управления. Для случая прямого включения, при отсутствии специальных средств контроля и управления, значения КПД не могут превышать его теоретического предела 50 %. Полученные результаты по отдельным режимам энергопреобразования и выводы хорошо согласуются с результатами исследований других авторов, выполненных в разное время.

Ключевые слова: электромагнитный двигатель, коэффициент полезного действия, режим энергопреобразования, элементарные магнитные циклы, коэффициент восстановления магнитной энергии.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-45-59

Введение

Основное применение электромагнитные двигатели (ЭМД) получили в дискретных импульсных системах с фиксированным перемещением исполнительных органов. Типичным примером использования дискретных систем являются электромагнитные приводы коммутационной аппаратуры, ударного электроинструмента, молотов, вибраторов, прессового оборудования, ударных источников сейсмических волн и т. д. [1–4].

Перспективность применения электромагнитного привода в перечисленных устройствах прежде всего определяется их надежностью, простотой конструкции, минимальными затратами при обслуживании [5–8]. Работа электромагнитного привода при больших динамических перегрузках считается нормальным режимом его функционирования [9, 10].

Несмотря на давнее использование электромагнитного привода, по-прежнему остаются востребованными методы по его расчету в различных режимах [11–15]. Также большое внимание уделяется вопросам оптимизации режимов работы как за счет изучения процессов энергопреобразования, так и за счет применения новых рабочих циклов, способствующих повышению его эффективности [16–18].

Главным показателем любой машины или устройства, созданного на основе ЭМД, остается коэффициент полезного действия (КПД). Анализ существующих машин с ЭМД, а также выполненные расчеты машин, функционирующих в динамических режимах показывают, что уровень их КПД не превышает 50 % [19–21].

1. Постановка задачи исследования

Один из распространенных вариантов электромагнитного двигателя, применяемого в качестве привода прессового оборудования, приведен на рис. 1 [22–24]. Энергетические показатели и режимы энергопреобразования такого ЭМД во многом определяются видом переходной кривой динамической характеристики намагничивания в виде зависимости $\psi = f(i)$ [25]. Внешний вид подобной характеристики намагничивания на интервале движения якоря ЭМД представлен на рис. 2.

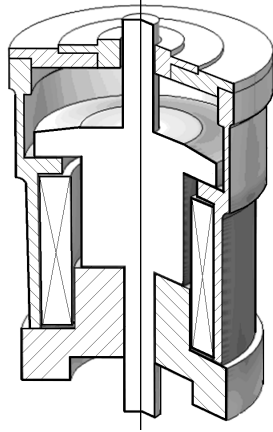


Рис. 1 – Электромагнитный двигатель
Fig. 1 – Electromagnetic motor

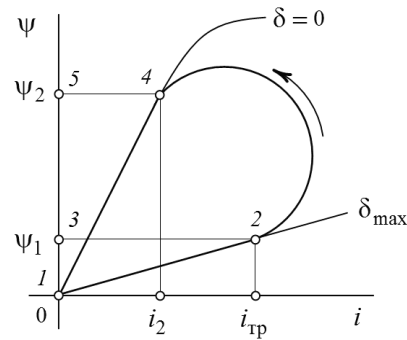


Рис. 2 – Переходная динамическая характеристика намагничивания
Fig. 2 – The transient dynamic characteristic of magnetization

Согласно рис. 2 магнитная энергия, запасенная в системе ЭМД к началу движения якоря,

$$A_1 = \int_0^{\psi_1} i d\psi = S_{1231},$$

где S_{1231} – соответствующая площадь поверхности на рис. 2.

Магнитная энергия, приобретенная системой за время движения якоря,

$$A_2 = \int_{\psi_1}^{\psi_2} i d\psi = S_{24532}.$$

Магнитная энергия, накопленная системой к концу движения якоря,

$$A_3 = \int_0^{\psi_2} i d\psi = S_{1451}.$$

Согласно закону сохранения энергии $A_1 + A_2 = A_3 + A_{\text{мех}}$, механическая работа по перемещению якоря из точки 2 с координатой δ_{max} в точку 4 с координатой $\delta = 0$ определится как

$$A_{\text{мех}} = A_1 + A_2 - A_3 = S_{1241}.$$

Внешний вид переходной характеристики $\psi = f(i)$ (рис. 2) может быть различным и при детальном рассмотрении несложно установить, что формируется он из совокупности промежуточных элементарных магнитных циклов (рис. 3), характеризующих процессы энергопреобразования за время движения якоря ЭМД [26–28].

Основными показателями, способствующими такому разделению, являются знаки приращения потокосцепления [29]. Все процессы, происходящие с увеличением потокосцепления $d\psi > 0$, сопровождаются потреблением энергии из сети. Процессы, происходящие с уменьшением потокосцепления $d\psi < 0$, сопровождаются отдачей энергии обратно в сеть. Уменьшение рабочего воздушного зазора в соответствии с направлением указателя в виде стрелки на рис. 3 свидетельствует о том, что электромагнитные силы совершают положительную работу, связанную с перемещением якоря и преодолением внешней механической силы (двигательный режим).

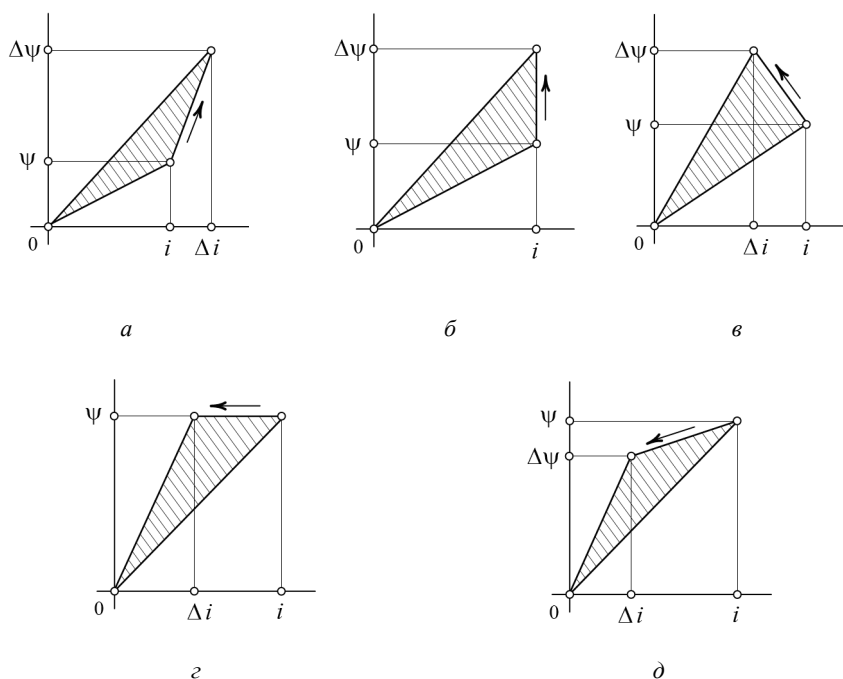


Рис. 3 – Элементарные магнитные циклы для двигательного режима

Fig. 3 – Elementary magnetic cycles for the motor mode

Существующее многообразие процессов энергопреобразования можно разделить на несколько групп (режимов), обладающих общими свойствами и характеризующих процессы движения якоря: 1) при одновременном нарастании тока и потокосцепления (рис. 3, а); 2) при постоянном токе и увеличивающемся потокосцеплении (рис. 3, б); 3) при уменьшающемся токе и увеличивающемся потокосцеплении (рис. 3, в); 4) при уменьшающемся токе и постоянном потокосцеплении (рис. 3, г); 5) при уменьшающемся токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, д).

Каждый из представленных на рис. 3 элементарных магнитных циклов позволяет установить энергию, запасенную в системе на момент начала и окончания

движения якоря, сообщенную системе энергию за время движения и энергию на создание механической работы.

Согласно закону сохранения энергии, энергия пропорциональная заштрихованной области (рис. 3), определяет механическую работу $\Delta A_{\text{мех}}$ по перемещению якоря.

Исследования энергетических показателей на основе анализа элементарных магнитных циклов, позволяющих относительно просто устанавливать зависимости токов и потокосцеплений от координаты положения якоря, хорошо известны [30].

Однако в вопросах достижения предельных значений КПД в процессе совершения полезной механической работы в основном исходят из частных случаев постоянства тока ($i = \text{const}$) или потокосцепления ($\psi = \text{const}$) [31, 32]. Вызвано это только тем, что введение подобного рода ограничений, относительно характера поведения зависимости $\psi = f(i)$ при движении якоря, упрощает процедуру математических выкладок с использованием энергетических соотношений, а также упрощает анализ получаемых результатов.

Для случая линейной среды установим предпочтительность в использовании магнитных циклов и соответствующих циклам режимов энергопреобразования, характеризующих однократный процесс ускорения якоря магнитным полем, исходя из условия реализации предельных КПД электромагнитного двигателя.

2. Условия реализации предельного КПД режима энергопреобразования

Для анализа условий реализации предельного КПД не будем учитывать влияние активных потерь энергии в катушке ($W_Q \approx 0$), так как данные потери не зависят от конфигурации магнитного цикла и определяют только тепловое состояние всей системы. Полезной работой условимся считать механическую работу, которую совершают электромагнитные силы при перемещении якоря из начального ($\delta = \delta_{\text{max}}$) в конечное ($\delta = 0$) положение.

Коэффициент полезного действия будем определять как отношение полезной механической работы $\Delta A_{\text{мех}}$ к сумме начальной энергии магнитного поля ΔW_1 и энергии, сообщенной системе за время движения ΔW_3 . Предполагая $W_Q \approx 0$, находим КПД электромагнитного двигателя без активных потерь:

$$\eta = \frac{\Delta A_{\text{мех}}}{\Delta W_1 + \Delta W_3}. \quad (1)$$

Работу электромагнитных сил на бесконечно малом интервале перемещения якоря определяем из баланса энергии как сумму начальной энергии ΔW_1 и энергии ΔW_3 за вычетом конечной энергии магнитного поля ΔW_2 :

$$\Delta A_{\text{мех}} = \Delta W_1 + \Delta W_3 - \Delta W_2.$$

Для анализа фактического перераспределения энергии, потребляемой или отдаваемой источнику питания на интервале движения, целесообразно воспользоваться коэффициентом восстановления магнитной энергии, отражающим степень изменения энергии магнитного поля по отношению к энергии, затраченной для совершения механической работы [33]:

$$k_B = \frac{\Delta W_M}{\Delta A_{\text{мех}}} = \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех}}}. \quad (2)$$

Условия протекания процессов энергопреобразования на границах раздела их режимов в зависимости от величины и знака коэффициента восстановления (2) рассмотрены в таблице.

Условия протекания процессов энергопреобразования
Conditions of energy conversion processes

Номер условия	Коэффициент восстановления	Условия протекания процессов
1	$0 < k_B < 1$	Электрическая энергия источника расходуется на совершение механической работы и на увеличение энергии магнитного поля. Причем затраты энергии на совершение механической работы превышают затраты энергии на увеличение энергии магнитного поля
2	$k_B = 1$	Электрическая энергия источника в равных долях расходуется на совершение механической работы и увеличение энергии магнитного поля
3	$k_B > 1$	Затраты электрической энергии источника на увеличение энергии магнитного поля превышают затраты энергии на совершение механической работы
4	$k_B = 0$	Электрическая энергия, поступающая от источника, расходуется только на совершение механической работы
5	$-1 < k_B < 0$	Механическая работа частично совершается за счет электрической энергии источника и частично за счет энергии магнитного поля
6	$k_B = -1$	Электрическая энергия от источника не поступает. Механическая работа совершается только за счет энергии магнитного поля
7	$k_B < -1$	Энергия магнитного поля используется для совершения механической работы и частично передается источнику в виде электрической энергии

Основные режимы энергопреобразования и сопутствующие данным режимам элементарные магнитные циклы, определяющие общий вид переходной кривой намагничивания, представлены на рис. 3.

Полагаем, что на начало движения якоря система характеризуется значениями начального тока $i = i_n$ и начального потокосцепления $\psi = \psi_n$, а в конце движения – значениями конечного тока $i_k = i + \Delta i$ и конечного потокосцепления $\psi_k = \psi + \Delta \psi$. Условия позволяют начальные и конечные значения токов и потокосцеплений выразить через их приращения в виде $\Delta i = i_k - i_n$, $\Delta \psi = \psi_k - \psi_n$.

Выражая входящие в (1) составляющие от энергий через начальные и конечные значения токов и потокосцеплений, получим соотношения для анализа условий реализации предельных КПД, удовлетворяющие режиму энергопреобразования и конфигурации элементарного магнитного цикла (рис. 3).

Рассмотрим основные режимы энергопреобразования (работы электромагнитных сил) в соответствии с элементарными циклами намагничивания на рис. 3.

Режим энергопреобразования при увеличивающемся токе и потокосцеплении (рис. 3, а). Коэффициент полезного действия режима без активных потерь

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \frac{\Delta A_{\text{мех1}}}{\Delta W_1 + \Delta W_3} = \frac{\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi + i\Delta\psi + \frac{1}{2}\Delta i\Delta\psi} = \\ &= \frac{i_{\text{н}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{к}}\psi_{\text{н}}}{i_{\text{н}}\psi_{\text{к}} + i_{\text{к}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{к}}\psi_{\text{н}}} = \frac{\frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}{1 + \frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}.\end{aligned}\quad (3)$$

Предельным случаем (3) является условие $i_{\text{к}} \rightarrow i_{\text{н}}$ и $\psi_{\text{н}} \rightarrow 0$, при которых КПД будет максимальным и соответствовать $\eta_1 = 0,5$.

При этом коэффициент восстановления магнитной энергии

$$\begin{aligned}k_{\text{в1}} &= \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех1}}} = \frac{\frac{1}{2}(\psi + \Delta\psi)(i + \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i} = \\ &= \frac{i_{\text{к}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{н}}\psi_{\text{н}}}{i_{\text{н}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{к}}\psi_{\text{н}}} = \frac{1 - \frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}{\frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}},\end{aligned}\quad (4)$$

и в предельном случае $k_{\text{в1}} = 1,0$. Таким образом, при поддержании режима в предельном случае перераспределение потребляемой от источника энергии таково, что только половина потребляемой энергии может быть преобразована в механическую работу, другая половина энергии идет на увеличение энергии магнитного поля системы.

Фактическое значение КПД данного режима, даже без учета активных потерь энергии на нагрев, менее 50%. Так, если принять для режима $\psi_{\text{н}}/\psi_{\text{к}} = 0,6$ и $i_{\text{н}}/i_{\text{к}} = 0,8$, то согласно (3) КПД составит $\eta_1 = 0,17$, а коэффициент восстановления в соответствии с (4) увеличится до $k_{\text{в1}} = 2,6$.

Столь существенное снижение КПД режима по сравнению с предельным случаем вызвано тем (см. таблицу), что затраты электрической энергии на увеличение энергии магнитного поля за время движения составляют 72,2% и значительно превышают затраты этой энергии для совершения механической работы (27,8%).

Режим энергопреобразования при условии постоянства тока ($i = \text{const}$) и увеличивающемся потокоцеплении (рис. 3, б). Коэффициент полезного действия режима

$$\eta_2 = \frac{\Delta A_{\text{мех2}}}{\Delta W_1 + \Delta W_3} = \frac{\frac{1}{2}i\Delta\psi}{\frac{1}{2}i\psi + i\Delta\psi} = \frac{\psi_{\text{к}} - \psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{н}} + 2(\psi_{\text{к}} - \psi_{\text{н}})} = \frac{1 - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}{2 - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}.\quad (5)$$

Предельным случаем режима (5) является условие $\psi_{\text{н}} \rightarrow 0$, при котором КПД будет максимальным ($\eta_2 = 0,5$).

Коэффициент восстановления магнитной энергии для режима

$$k_{в2} = \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех}2}} = \frac{\frac{1}{2}i(\psi + \Delta\psi) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}i\Delta\psi} = 1. \quad (6)$$

Увеличение энергии магнитного поля или энергии, расходуемой на совершение механической работы в данном режиме, всегда равно половине потребляемой от источника энергии (см. таблицу). Это означает, что механическая работа в точности равна увеличению энергии магнитного поля и не зависит от начального и конечного значения потокосцепления.

Если принять для режима за время движения якоря $\psi_n/\psi_k = 0,6$, то согласно (5) КПД без учета активной составляющей потерь энергии на нагрев составит $\eta_2 = 0,29$. С увеличением разницы между начальным и конечным значением потокосцепления КПД возрастает (при $\psi_n/\psi_k = 0,4$ получим $\eta_2 = 0,38$).

Результаты анализа по данному режиму полностью согласуются с результатами других авторов [31, 32].

Следующий режим энергопреобразования характеризуется уменьшающимся током и увеличивающимся потокосцеплением (рис. 3, в). Коэффициент полезного действия режима

$$\begin{aligned} \eta_3 &= \frac{\Delta A_{\text{мех}3}}{\Delta W_1 + \Delta W_3} = \frac{\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi + \Delta\psi(i - \Delta i) + \frac{1}{2}\Delta i\Delta\psi} = \\ &= \frac{i_n\psi_k - i_k\psi_n}{i_n\psi_k + i_k\psi_k - i_k\psi_n} = \frac{1 - \frac{i_k}{i_n}\frac{\psi_n}{\psi_k}}{1 + \frac{i_k}{i_n} - \frac{i_k}{i_n}\frac{\psi_n}{\psi_k}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что границами раздела режима энергопреобразования являются режимы для $i = \text{const}$ и $\psi = \text{const}$, в качестве предельного случая режима (7) следует рассмотреть два условия. Для первого условия $\psi_n \rightarrow 0$ и $i_k \rightarrow i_n$ предельный КПД режима составит $\eta_3 = 0,5$. Для второго условия $\psi_k \rightarrow \psi_n$ и $i_k \rightarrow 0$ КПД режима будет максимальным и составит $\eta_3 = 1,0$. Следовательно, КПД режима энергопреобразования следует рассматривать в пределах $0,5 \leq \eta_3 \leq 1,0$.

Коэффициент восстановления магнитной энергии

$$\begin{aligned} k_{в3} &= \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех}3}} = \frac{\frac{1}{2}(\psi + \Delta\psi)(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i} = \\ &= \frac{i_k\psi_k - i_n\psi_n}{i_n\psi_k + i_k\psi_n - 2i_n\psi_k} = \frac{\frac{i_k}{i_n} - \frac{\psi_n}{\psi_k}}{1 + \frac{i_k}{i_n}\frac{\psi_n}{\psi_k} - 2\frac{\psi_n}{\psi_k}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Рассматривая (8) как предельный случай, при котором КПД будет максимальным, получим $k_{в3} = -1,0$. Фактически это означает (см. таблицу), что механиче-

ская работа должна совершаться только за счет уменьшения запасенной ранее энергии магнитного поля, в то время как электрическая энергия от источника в систему не поступает.

Одной из особенностей рассматриваемого режима является возможность совершения механической работы без приращения энергии магнитного поля ($dW_M = 0$). В этом режиме вся энергия, поступающая от источника, расходуется на совершение механической работы, при этом $k_{в3} = 0$ (см. таблицу).

Приравнявая (8) нулю получим условие, при котором приращение энергии магнитного поля при движении якоря отсутствует:

$$\frac{\Psi_H}{\Psi_K} = \frac{i_K}{i_H}. \quad (9)$$

При данном условии (9) КПД режима энергопреобразования может быть получен с использованием одного из упрощенных выражений:

$$\eta_3 = \frac{1 - \left(\frac{\Psi_H}{\Psi_K}\right)^2}{1 + \frac{\Psi_H}{\Psi_K} - \left(\frac{\Psi_H}{\Psi_K}\right)^2} = \frac{1 - \left(\frac{i_K}{i_H}\right)^2}{1 + \frac{i_K}{i_H} - \left(\frac{i_K}{i_H}\right)^2}. \quad (10)$$

В этом случае достаточно установить только кратность изменения потокоцепления или тока либо обладать их начальными и конечными значениями.

Например, при $\Psi_H/\Psi_K = 0,5$, согласно (10), получим КПД режима $\eta_3 = 0,6$.

Рассматривая самый общий случай режима энергопреобразования для $\Psi_H/\Psi_K = 0,4$, $i_K/i_H = 0,6$, КПД в соответствии с (7) без учета активных потерь составит $\eta_3 = 0,56$, а коэффициент восстановления магнитной энергии по (8) будет равен $k_{в3} = 0,45$. Условия протекания процесса таковы, что затраты электрической энергии источника для совершения механической работы в 2,2 раза (68,7 %) превышают затраты этой энергии, запасаемой в магнитном поле системы (31,3 %) за время движения якоря.

Режим энергопреобразования при постоянстве потокоцепления $\psi = \text{const}$ и уменьшающемся токе (рис. 3, з). Полагая, что электрическая энергия источника за время движения якоря в систему не поступает ($\Delta W_3 = 0$), выражение (1) для коэффициента полезного действия режима значительно упрощается:

$$\eta_4 = \frac{\Delta A_{\text{мех4}}}{\Delta W_1} = \frac{\frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi} = \frac{i_H - i_K}{i_H} = 1 - \frac{i_K}{i_H}. \quad (11)$$

В конкретном случае (11) КПД режима энергопреобразования определяется только начальным и конечным значением тока. Предельным случаем режима следует рассматривать условие $i_K \rightarrow 0$, при котором КПД может быть близок к единице ($\eta_4 = 1,0$).

Коэффициент восстановления магнитной энергии режима

$$k_{в4} = \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех4}}} = \frac{\frac{1}{2}\psi(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}\psi\Delta i} = -1,0. \quad (12)$$

Условие протекания процесса энергопреобразования таково (см. таблицу), что механическая работа системы совершается только за счет энергии магнитного поля системы, запасенной до начала движения. Причем электрическая энергия от источника в систему не поступает.

Например, при различии токов за время движения $i_k/i_n = 0,6$ КПД режима составит $\eta_4 = 0,4$. При большем различии токов за время движения $i_k/i_n = 0,4$ КПД возрастает до $\eta_4 = 0,6$. Результаты анализа по данному режиму также хорошо согласуются с исследованиями авторов известных работ [31, 32].

Режим энергопреобразования при уменьшающемся токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, д). Коэффициент полезного действия режима с учетом изменения знака потокосцепления

$$\begin{aligned} \eta_5 &= \frac{\Delta A_{\text{мех}}}{\Delta W_1 - \Delta W_3} = \frac{-\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi - \Delta\psi(i - \Delta i) - \frac{1}{2}\Delta i\Delta\psi} = \\ &= \frac{i_n\psi_k - i_k\psi_n}{i_k\psi_k - i_k\psi_n - i_n\psi_k} = \frac{\frac{\psi_k}{\psi_n} - \frac{i_k}{i_n}}{\frac{i_k}{i_n} \frac{\psi_k}{\psi_n} - \frac{i_k}{i_n} + \frac{\psi_k}{\psi_n}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Предельным случаем режима (13) следует рассматривать условие $\psi_k \rightarrow \psi_n$ и $i_k \rightarrow 0$, при которых КПД будет максимальным и соответствовать $\eta_5 = 1,0$.

Коэффициент восстановления магнитной энергии режима

$$\begin{aligned} k_{B5} &= \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех}5}} = \frac{\frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{-\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i} = \\ &= \frac{i_k\psi_k - i_n\psi_n}{i_n\psi_k - i_k\psi_n} = \frac{\frac{i_k}{i_n} \frac{\psi_k}{\psi_n} - 1}{\frac{\psi_k}{\psi_n} - \frac{i_k}{i_n}}, \end{aligned} \quad (14)$$

и в предельном случае имеем $k_{B5} = -1$.

В предельном случае механическая работа совершается только за счет энергии, запасенной в магнитном поле. При этом электрическая энергия не потребляется и не передается обратно источнику.

Для самого общего случая режим энергопреобразования может характеризоваться относительно высоким КПД. Особенность режима заключается в том, что энергия электромагнитного поля системы используется для совершения полезной механической работы и одновременного возврата энергии источнику в виде электрической энергии ($k_{B5} < -1$, см. таблицу).

Так, если принять для режима за время движения якоря $\psi_n/\psi_k = 0,8$ и $i_k/i_n = 0,4$, то в соответствии с (13) КПД составит $\eta_5 = 0,56$, а коэффициент восстановления магнитной энергии согласно (14) $k_{B5} = -1,7$. Анализ режима показы-

вает, что за время движения якоря энергия магнитного поля системы по отношению к начальной уменьшилась на 68 %, из которой 40 % энергии затрачено на совершение механической работы и 28 % энергии переданы источнику.

Заключение

Основным выводом по работе следует указать предпочтительность в использовании отдельных режимов энергопреобразования, поддерживающих предельные значения КПД электромагнитного двигателя на дискретном интервале движения якоря.

Значения КПД без учета тепловых потерь для некоторых режимов энергопреобразования теоретически может составлять до 100 %, однако реализация подобных режимов возможна только при наличии специальных средств автоматического управления.

Для случая прямого включения ЭМД, т. е. при отсутствии средств контроля и управления, теоретическое значение КПД режимов энергопреобразования не может превышать 50 %-го порога при однократном процессе ускорения якоря в магнитном поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
3. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
4. **Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
5. **Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
6. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во Тольят. гос. ун-та, 2012. – 142 с.
7. **Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю.** Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.
8. **Усанов К.М., Каргин В.А.** Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.
9. **Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.** Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
10. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
11. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
12. **Нейман Л.А., Петрова А.А., Нейман В.Ю.** К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 62–64.

13. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
14. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
15. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
16. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
17. **Нейман В.Ю., Петрова А.А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
18. **Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В.** Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 1. – С. 86–87.
19. **Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О.** Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 119 с.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
21. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–79.
22. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
23. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
24. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
25. **Нейман В.Ю.** Энергопреобразование ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 135–148.
26. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
27. **Родштейн Л.А.** Электрические аппараты: учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
28. **Малинин В.И., Ряшенцев А.Н., Толстик А.И.** Оценка динамического КПД электромагнита с ненасыщенной магнитной системой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1989. – № 9. – С. 86–90.
29. **Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н.** Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
30. **Мошкин В.И., Угаров Г.Г.** Исследование комбинированных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа // Импульсный электромагнитный привод / под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 38–44.
31. **Ивашин В.В.** Об оптимальном режиме работы электромагнитов с точки зрения увеличения их удельной импульсной мощности // Силовые полупроводниковые и импульс-

- ные электромеханические преобразовательные устройства / под общ. ред. В.В. Ивашина. – Куйбышев: Изд-во КАИ, 1976. – С. 24–28.
32. **Бондалетов В.Н.** Определение электромагнитных сил, их работы и электромеханического к.п.д. в контурах с токами // *Электричество*. – 1966. – № 1. – С. 57–60.
 33. **Угаров Г.Г.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями: автореф. дис. ...д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 46 с.

CONDITIONS OF ACHIEVING ELECTROMAGNETIC MOTOR MAXIMAL EFFICIENCY

Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Energy conversion modes of the electromagnetic motor when the armature is accelerated are established to be preferable with respect to maximal efficiency. A non-saturated electromagnetic motor where the armature is once accelerated in the magnetic field generated by the inductor is considered to be a research subject. New relations are obtained for the analysis of the conditions when the maximal efficiency is achieved with respect to the energy conversion mode and the elementary magnetic cycle configuration. It is shown that the efficiency of about 100 % can be theoretically achieved only if special automatic control means are used. The efficiency cannot be more than a theoretical limit of 50 % if there is no automatic control. The obtained results and conclusions for separate energy conversion modes are well agreed with the results obtained by other authors in the past.

Keywords: electromagnetic motor, efficiency, energy conversion mode, elementary magnetic cycles, recovery coefficient of magnetic energy.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-45-59

REFERENCES

1. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drive for pulse technology and vibroimpulsnyh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
2. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii [Low-frequency impact electromagnetic machines and technologies]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 256–259.
3. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsiionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.
4. Simonov B.F., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Impul'snyi lineinyi elektromagnitnyi privod dlya skvazhinного vibroistochnika [Pulsed linear electromagnetic drive for downhole vibration source]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 2017, no. 1, pp. 118–126.
5. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem [Prospects of electromagnetic pulse of power systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 29, pp. 88–90.
6. Pevchev V.P., Ivashin V.V. Proektirovanie moshchnykh korotkokhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei [Designing powerful pulsed electromagnetic short-stroke engine]. *Tol'yatti, Togliatti State University Publ.*, 2012. 142 p.
7. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. Strukturnyi analiz sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Structural analysis of synchronous electromagnetic shock machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy [Automated electromechanical systems]*. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.

8. Usanov K.M., Kargin V.A. Silovaya elektromagnitnaya impul'snaya sistema dlya pogruzheniya sterzhnevyykh elementov v grunt [Power electromagnetic pulse system for inserting rod elements into soil]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova – The Bulletin of Saratov state agrarian university in honor of N.I. Vavilov*, 2005, no. 3, pp. 59–61.
9. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitnyi privod lineinykh mashin* [The electromagnetic linear actuator machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
10. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Periodicheskie rezhimy v elektromagnitnykh vibratsionnykh preobrazovatelyakh [Periodic modes in the electromagnetic vibration converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2010, vol. 14, no. 1 (36), pp. 50–55.
11. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovaniye protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovoде [Modelling of processes in the electromagnetic vibration transducer with energy losses in the yoke]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 73–78.
12. Neyman L.A., Petrova A.A., Neyman V.Yu. K otsenke vybora tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [On the electromagnet type selection by a design factor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 62–64.
13. Neyman V.Yu. Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyaniye sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [Influence of major proportions electromagnets sizes on the value of constructive factor and indicator of profitability]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primeneniye metoda provodimostey dlya ucheta sily odnostoronnogo magnitnogo prityazheniya asimmetrichnogo elektromagnita [Application conductivities method to account for the strength of a unilateral asymmetric magnetic attraction of the electromagnet]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 214–218.
15. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Raschet pokazatelya ekonomichnosti silovogo elektromagnita postoyannogo toka s pomoshch'yu modelirovaniya magnitnogo polya [The calculation of the efficiency indicator of a DC power electromagnet using magnetic field simulation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transportation: science, technology, management*, 2008, no. 6, pp. 21–24.
16. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochiy tsikl dvukhkatushechnoy sinkhronnoy elektromagnitnoy mashiny so svobodnym vybegom boika [Operation cycle of double winding synchronous electromagnetic machine with head free running out]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
17. Neyman V.Yu. Petrova A.A. Sravneniye sposobov forsirovki impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigateley [Comparison of forcing methods of pulsed linear electromagnetic motors]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50.
18. Usanov K.M., Kargin V.A., Volgin A.V. Otsenka effektivnosti energopreobrazovaniya v elektromagnitnoy udarnoy mashine s uprugim vozvratnym elementom [Evaluating the effectiveness of energy conversion in the electromagnetic shock machine with a resilient return element]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2008, no. 1, pp. 86–87.
19. Manzhosov V.K., Lukutina N.O., Nevenchannaya T.O. *Dinamika i sintez elektromagnitnykh generatorov silovykh impul'sov* [The dynamics and synthesis of electromagnetic power pulse generators]. Frunze, Ilim Publ., 1985. 119 p.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatelnogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.

21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s inertsionnym reversom boika [A dynamic model of a two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with an inertial head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 4 (33), pp. 61–79.
22. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
23. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Ways to improve the energy performance of single-winding pulsed devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
24. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Press equipment with a linear electromagnetic drive for the mechanization of technological processes of shock assembly and stamping of small products]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.
25. Neyman V.Yu. Energopreobrazovanie nenasyshchennogo elektromagnitnogo dvigatelya pri otrye yakorya vneshnimi silami [Energy conversion in a non-saturated electromagnetic motor with the armature detached by external forces]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 135–148.
26. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
27. Rodshtein L.A. *Elektricheskie apparaty* [Electrical apparatus]. 3rd ed. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 304 p.
28. Malinin V.I., Ryashentsev A.N., Tolstik A.I. Otsenka dinamicheskogo KPD elektromagnita s nenasyshchennoi magnitnoi sistemoi [Evaluation of the dynamic efficiency of an electromagnet with an unsaturated magnetic system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 1989, no. 9, pp. 86–90. (In Russian).
29. Ryashentsev N.P., Miroshnichenko A.N. *Vvedenie v teoriyu energopreobrazovaniya elektromagnitnykh mashin* [Introduction to the theory of energy conversion of electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 160 p.
30. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Issledovanie kombinirovannykh magnitnykh tsiklov elektromekhanicheskikh preobrazovatelei elektromagnitnogo tipa [Research of combined magnetic cycles of electromechanical converters of electromagnetic type]. *Impul'snyi elektromagnitnyi privod* [Pulsed electromagnetic drive]. Novosibirsk, IGD SO AN SSSR Publ., 1988, pp. 38–44.
31. Ivashin V.V. Ob optimal'nom rezhime raboty elektromagnitov s tochki zreniya uvelicheniya ikh udel'noi impul'snoi moshchnosti [On the optimal mode of operation of electromagnets in terms of increasing their specific pulse power]. *Silovye poluprovodnikovye i impul'snye elektromekhanicheskie preobrazovatel'nye ustroystva* [Power semiconductor and pulsed electromechanical converting devices]. Kuibyshev, 1976, pp. 24–28.
32. Bondaletov V.N. Opredeleniye elektromagnitnykh sil, ikh raboty i elektromekhanicheskogo k.p.d. v konturakh s tokami [Determination of electromagnetic forces, their work and electromechanical efficiency in circuits with currents]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 1966, no. 1, pp. 57–60.
33. Ugarov G.G. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye dvigateli s povyshennymi silovymi i energeticheskimi pokazatelyami*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Pulsed linear electromagnetic motors with increased power and energy indicators. Author's abstract of Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 1992. 46 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор и соавтор более 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960), D.Sc. (Eng.), professor, head of the Department of Electrical Engineering Fundamentals, Novosibirsk State Technical University. His research interests include power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific and educational manuals. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

*Статья поступила 10 декабря 2019 г.
Received December 10, 2019*

To Reference:

Neyman V.Yu. Usloviya realizatsii predel'nogo KPD elektromagnitnogo dvigatelya [Conditions of achieving electromagnetic motor maximal efficiency]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1-2 (46-47), pp. 45–59. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-45-59.

УДК: 621.396.01

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ФАЗОВАЯ ФОКУСИРОВКА ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
МАТРИЧНОГО ИМИТАТОРА НА ДВЕ ТОЧКИ ПРИЕМА****Т.И. Сабитов***Новосибирский государственный технический университет*

В данной работе рассматриваются вопросы построения конфигурации когерентного матричного имитатора для моделирования эхосигналов двухпозиционной системы. Сформулировано условие синфазности излучаемых сигналов в обеих точках приема в виде системы уравнений. Матрица, удовлетворяющая этому условию, обеспечивает имитацию цели в одном и том же положении для двух разнесенных антенн. Для обеспечения синфазности предложено использовать возможности размещения излучателей и управления начальными фазами сигналов. Получены соотношения для расчета координат излучателей двухточечной конфигурации и для расчета значения фазовой добавки. На основе этих соотношений разработан алгоритм синтеза расширенной одномерной матрицы с требуемым угловым размером. Показано, что точки такой матрицы могут быть расположены на одной прямой. Полученный алгоритм использован для синтеза конфигурации из семи излучателей для задаваемых параметров двухпозиционной системы. С помощью численных экспериментов произведена проверка адекватности модели. Задавались различные положения точечной цели, а для ее пеленга использовалась модель моноимпульсного пеленгатора. Результаты численных экспериментов подтверждают достоверность полученных теоретических результатов. Они могут быть использованы при математическом и имитационном моделировании отражений от реальных радиолокационных целей для двухпозиционных систем.

Ключевые слова: матричный имитатор, двухпозиционная система, моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-60-67

Введение

На сегодняшний день довольно подробно изучены вопросы имитации отражений электромагнитных волн от реальных объектов. Известные результаты [1–4] находят применение в полунатурном моделировании сигнально-помеховой обстановки, что позволяет осуществлять настройку и проверку качества работы радиолокационных систем (РЛС) в лабораторных условиях. Это значительно удешевляет и ускоряет процесс тестирования системы в сравнении с натурными испытаниями.

Для моделирования эхосигналов от радиолокационных целей используют имитаторы. Наибольшее распространение получили матричные имитаторы (МИ) [1–3] в силу своих преимуществ: с их помощью на апертуре антенны исследуемой РЛС воспроизводится фронт электромагнитной волны, соответствующий отражениям от реальных объектов. При этом обеспечивается моделирование плавных перемещений цели с требуемой скоростью по заданной траектории.

В основе работы МИ используется то, что неразрешаемые антенной излучатели воспринимаются как одиночный источник – кажущийся центр излучения (КЦИ). КЦИ замещает точечную цель или отражатель многоточечного распределенного объекта. Положение КЦИ зависит от фаз и амплитуд излучаемых сигналов, приведенных в точку приема. Для двухточечной конфигурации [5]

$$\Delta\xi = (z_0^2 - 1) / (1 + 2z_0 \cos \psi + z_0^2), \quad (1)$$

где $z_0 = E_2 / E_1$ – отношение амплитуд сигналов; ψ – разность фаз; $\Delta\xi$ – нормированная координата КЦИ – отношение отклонения КЦИ от центра конфигурации к половине ее размера.

В работе [6] были исследованы вопросы достоверности моделирования эхосигналов матричными имитаторами. Установлено, что имеют место ошибки моделирования, обусловленные замещением точечного отражателя группой излучателей. Эти ошибки выражаются в отклонении КЦИ от задаваемого положения. Показано, что наименьшими ошибками моделирования обладают синфазные конфигурации излучателей ($\psi = 0$).

Для обеспечения синфазности сигналов излучатели располагают равноудаленно от точки приема. Однако если излучателей матрицы больше двух, то их располагают на одной прямой, а синфазности добиваются путем управления фазами подводимых к излучателям сигналов.

Известные конфигурации когерентных МИ разработаны для одноантенных систем. Для многопозиционных систем излучатели надо сфокусировать на все точки приема. А именно расположить так, чтобы разность фаз сигналов для всех точек приема была равна нулю. При этом имитируемая точечная цель будет наблюдаться в одном и том же положении для всех антенн.

В работах [7, 8] исследованы вопросы пространственной фокусировки одномерных и двумерных конфигураций на две точки приема. Результаты этих работ позволяют рассчитать координаты излучателей расширенных N -точечных матриц с требуемым угловым размером, обеспечивающих имитацию точечной цели в одном и том же положении для обеих антенн. Однако при этом точки излучения одномерной матрицы не могут быть расположены на одной прямой, а двумерной – в одной плоскости, что усложняет их практическую реализацию.

В данной работе предлагается рассмотреть возможности фокусировки матрицы излучателей на две точки приема, используя не только возможность управления взаимным расположением излучателей, но и возможность управления фазами сигналов. Данную фокусировку будем называть пространственно-фазовой. Предполагается, что это позволит синтезировать N -точечные матрицы излучателей, лежащих на одной прямой.

Цель работы – получить соотношения для расчета координат излучателей и значений фазовых добавок, для которых обеспечивается синфазность сигналов в двух точках приема.

1. Теория

Рассмотрим произвольную двухточечную конфигурацию (рис. 1). Запишем условие синфазности сигналов в двух точках приема:

$$\begin{cases} \Delta\phi_2 + \frac{2\pi}{\lambda}(R_{1A} - R_{2A}) = 2\pi k_1, \\ \Delta\phi_2 + \frac{2\pi}{\lambda}(R_{1B} - R_{2B}) = 2\pi k_2, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta\phi_2$ – фазовая добавка к сигналу второго излучателя; R_{it} – расстояние между i -м излучателем и t -й антенной; λ – длина волны; k_1 и k_2 – целые числа.

Разность уравнений системы (2) после преобразований имеет вид

$$R_{1A} - R_{2A} - R_{1B} + R_{2B} = n\lambda, \quad (3)$$

где $n = k_1 - k_2$ – целое число.

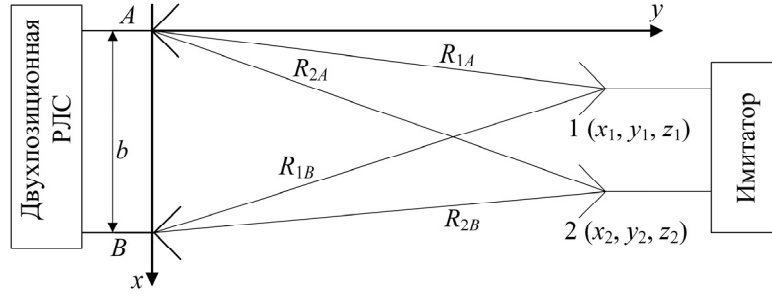


Рис. 1 – Матрица из двух излучателей применительно к двухпозиционной системе:

A, B – приемные антенны; 1, 2 – номера излучателей; b – расстояние между антеннами;
 R_{it} – расстояние между i -м излучателем и t -й антенной

Fig. 1 – A matrix of two radiators as applied to a two-position system:

A, B are receiving antennas; 1, 2 are the numbers of the radiators; b is the distance between the antennas; R_{it} is the distance between the i -th emitter and the t -th antenna

Запишем соотношение (3) с учетом введенной системы координат, связанной с антенной A :

$$\sqrt{(x_2 - b)^2 + y_2^2} - \sqrt{x_2^2 + y_2^2} = \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2} - \sqrt{x_1^2 + y_1^2} + n\lambda. \quad (4)$$

Пусть координаты первого излучателя заданы, и излучатели должны быть расположены на одной прямой $y_1 = y_2 = y$. Тогда правая часть уравнения может быть рассчитана отдельно как $F = f(x_1, y, n, b, \lambda)$, и (4) имеет вид

$$\sqrt{(x_2 - b)^2 + y^2} - \sqrt{x_2^2 + y^2} = F. \quad (5)$$

Решим (5) относительно абсциссы второго излучателя. Сделаем замену $x_2 = x'_2 + b/2$ и подставим ее в (5):

$$\begin{aligned} \sqrt{(x'_2 - b/2)^2 + y^2} &= \sqrt{(x'_2 + b/2)^2 + y^2} + F, \\ -2bx'_2 - F^2 &= 2F\sqrt{(x'_2 + b/2)^2 + y^2}, \\ 4(b^2 - F^2)x'^2_2 &= F^2b^2 + 4F^2y^2 - F^4, \\ x'_2 &= \pm \frac{F}{2} \sqrt{1 + \frac{4y^2}{b^2 - F^2}}. \end{aligned}$$

Делаем обратную замену:

$$x_2 = \pm \frac{F}{2} \sqrt{1 + \frac{4y^2}{b^2 - F^2}} + \frac{b}{2}. \quad (6)$$

Найденное соотношение позволяет ограничиться случаем симметричной конфигурации. Действительно, при $x_1 = b/2$ значения x_2 оказываются симметричными относительно $b/2$, и (6) преобразуется к виду

$$x_2 = \frac{b}{2} \pm \frac{n\lambda}{2} \sqrt{1 + \frac{4y^2}{b^2 - n^2\lambda^2}}. \quad (7)$$

Соотношение для расчета фазовой добавки может быть получено из первого уравнения системы (2):

$$\Delta\varphi_2 = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x_1^2 + y^2} - \sqrt{x_2^2 + y^2} \right) \right] \bmod 2\pi, \quad (8)$$

где mod – операция взятия остатка от целочисленного деления.

Используя (7) и (8), можно предложить следующий алгоритм синтеза протяженной матрицы.

1. Задаются исходные данные: параметры системы b и λ , расстояние между матрицей и системой y , абсцисса первого излучателя $x_1 = b/2$.

2. Задается ориентировочная координата второго излучателя x'_2 при условии $x'_2 \leq x_1 + y \operatorname{tg}(\alpha/2)$, где α – ширина ДНА по уровню половинной мощности.

3. Из (4) рассчитывается значение n , которое округляется до целого. С помощью (7) уточняется координата второго излучателя x_2 .

4. Найденная координата второго излучателя становится исходной для расчета координаты следующего, третьего излучателя в соответствии с пунктами 2 и 3.

5. Пункты со 2 по 4 циклично повторяются, пока не будет найдена точка расположения крайнего правого излучателя.

6. Найденные точки отображаются относительно оси симметрии матрицы $x_1 = b/2$.

7. С помощью (8) рассчитывается фазовая добавка $(i + 1)$ -го излучателя относительно фазы i -го.

В качестве примера синтезируем матрицу для имитации цели в диапазоне $x_{\text{КЦИ}} \in [-1; 2]$ для $b = 1$ м, $\lambda = 0,03$ м. Первый излучатель располагаем в плоскости симметрии с координатами $(x_1, y_1) = (0,5; 5)$ м. Используя алгоритм, размещаем излучатели один за другим с шагом $\Delta x = 0,5$ м. Результаты применения алгоритма сведены в таблицу.

Координаты излучателей 7-точечной матрицы и значения фазовых добавок
The coordinates of the radiators of the 7-point matrix and the values of phase additives

Номер излучателя	Координаты $(x; y)$, м	Значение n	$\Delta\varphi$, град
4'	(-0,909;5)	–	–
3'	(-0,419;5)	–	51,86
2'	(0,046;5)	–	208,134
1	(0,5; 5)	-3	63,278
2	(0,954;5)	-3	296,722
3	(1,419;5)	-3	151,866
4	(1,909; 5)	–	308,14

2. Апробация результатов

Апробация результатов осуществлялась с помощью численных экспериментов. Задавались перемещения цели в диапазоне $x_{\text{КЦИ}} = [-0,9; 1,9]$ м. Если координата КЦИ удовлетворяла условию: $x_i \leq x_{\text{КЦИ}} \leq x_{i+1}$, то для этой пары излучателей рассчитывалась нормированная координата КЦИ:

$$\Delta\xi = \frac{2x_{\text{КЦИ}} - (x_{i+1} + x_i)}{x_{i+1} - x_i}.$$

По значению $\Delta\xi$ определялось отношению амплитуд сигналов с помощью (1) при условии, что $\psi = 0$.

Комплексные амплитуды сигналов i -х излучателей в t -й точке приема определялись соотношением

$$\dot{E}_{it} = E_i \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} R_{it} + \Delta\varphi_i \right].$$

Положение КЦИ, наблюдаемого из точек A и B , определялось с помощью модели моноимпульсного пеленгатора [9]:

$$F(i) = \operatorname{Re} \left(\frac{\Delta(i)}{\Sigma(i)} \right),$$

где $\Delta(i)$ – i -й отсчет сигнала, принятого моделью разностной диаграммой направленности пеленгатора; $\Sigma(i)$ – i -й отсчет сигнала, принятого моделью суммарной диаграммой направленности пеленгатора.

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2.

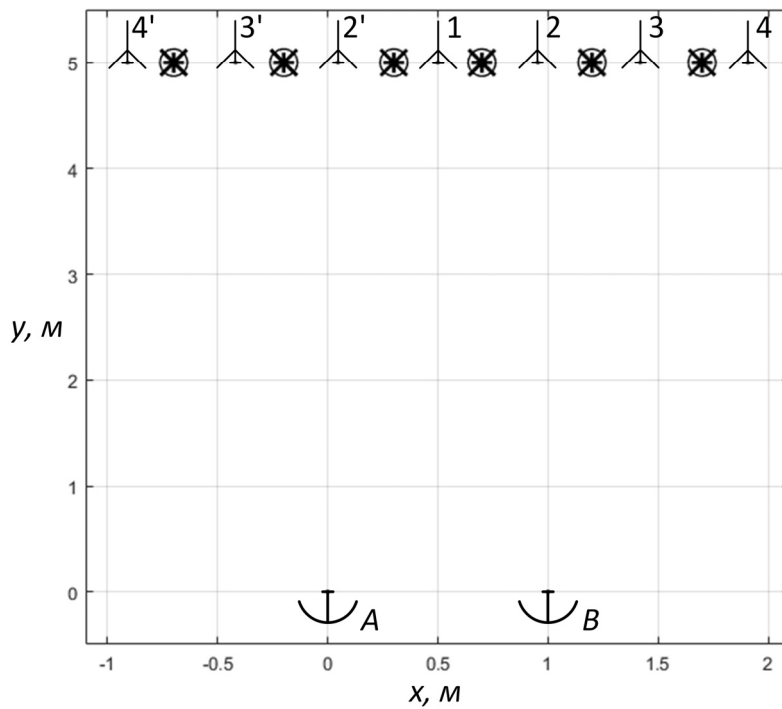


Рис. 2 – Результаты численных экспериментов:

× – цель, наблюдаемая антенной A ; + – цель, наблюдаемая антенной B ;
○ – задаваемые положения цели

Fig. 1 – Results of numerical experiments:

× is the target observed by the antenna A ; + is the target observed by the antenna B ;
○ is the required target positions

Видим, что обе антенны наблюдают цель в одних и тех же задаваемых положениях, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Заключение

Показано, что возможность управления фазами излучаемых сигналов предоставляет дополнительную степень свободы при размещении излучателей.

В частности, она позволяет разместить излучатели матрицы на одной прямой, что существенно упрощает ее реализацию.

Найдены соотношения для расчета таких матриц.

Достоверность полученных соотношений подтверждена с помощью численных экспериментов.

Полученные результаты могут быть использованы в разработке матричных имитаторов эхосигналов двухпозиционных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation / L. Hua, Z. Jianjiang, P. Minghai, Z. Hanwu // *Future Communication, Computing, Control and Management*. – 2012. – Vol. 2. – P. 125–134.
2. **Sisle M., McCarthy E.** Hardware-in-the-loop simulation for an active missile // *Simulation*. – 1982. – Vol. 39. – P. 159–167.
3. **Подкопаев А.О., Степанов М.А.** Синтез двухточечной частично когерентной модели, обеспечивающей заданные корреляционные характеристики угловых шумов, на основе ее эквивалентности трехточечной некогерентной модели с разделимостью пространственной и временной координат // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2019. – Вып. 4. – С. 16–21.
4. **Мельник А.Ю.** Радиолокационные методы исследования Земли. – М.: Советское радио, 1980. – 264 с.
5. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
6. **Тырыкин С.В., Киселев А.В.** Адекватность моделирования матричным имитатором электромагнитных полей, рассеянных точечной радиолокационной целью // *Излучение и рассеяние электромагнитных волн: материалы всероссийской научно-технической конференции*. – Таганрог, 2001. – С. 27–31.
7. **Сабитов Т.И., Киселев А.В.** Имитация эхосигналов двухпозиционных систем с использованием когерентных излучателей // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2019. – Вып. 4. – С. 42–46.
8. **Sabitov T.I., Kiselev A.V., Stepanov M.A.** Simulating an object's altitude for two-position systems // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2020. – Vol. 59, N 2. – P. 217–222.
9. **Канащенков А.И., Меркулов В.И.** Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.

SPATIAL-PHASE FOCUSING OF MATRIX SIMULATOR RADIATORS AT TWO RECEIVING POINTS

Sabitov T.I.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

This paper discusses the issues of constructing the configuration of a coherent matrix simulator for modeling echo signals of a two-position system. The condition is formulated in the form of a system of equations that the emitted signals are in-phase at both points of reception. A matrix satisfying this condition provides a simulation of a target in the same position for two spaced

antennas. To ensure in-phase operation, it is proposed to use the possibilities of placing the radiators and controlling the initial phases of the signals. Relations are obtained for calculating the coordinates of the 2-point configuration and for calculating the phase addition value. Based on these relations, an algorithm for the synthesis of an extended one-dimensional matrix with the required angular size is developed. It is shown that the points of such a matrix can be located on one straight line. The obtained algorithm was used to synthesize a configuration of seven emitters for the given parameters of the two-position system. Using numerical experiments, the adequacy of the model was verified. Different positions of the point target were set, and a monopulse direction finder model was used to find its direction. The results of numerical experiments confirm the reliability of the theoretical results. They can be used in mathematical and simulation modeling of reflections from real radar targets for two-position systems.

Keywords: matrix simulator, two-position radar system, simulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-60-67

REFERENCES

1. Hua L., Jianjiang Z., Minghai P., Hanwu Z. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation. *Future Communication, Computing, Control and Management*, 2012, vol. 2, pp. 125–134. DOI: 10.1007/978-3-642-27314-8_18.
2. Sisle M., McCarthy E. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile. *Simulation*, 1982, vol. 39, pp. 159–167. DOI: 10.1177/003754978203900503.
3. Podkopaev A.O., Stepanov M.A. Sintez dvukhtochechnoi chastichno kogerentnoi modeli, obespechivayushchei zadannye korrelyatsionnye kharakteristiki uglovykh shumov, na osnove ee ekvivalentnosti trekhtochechnoi nekogerentnoi modeli s razdelimost'yu prostranstvennoi i vremennoi koordinat [Synthesis of two-point partially coherent model, providing specified correlation characteristics of angular noise, based on its equivalence of three-point non-coherent model with separability of spatial and temporal coordinates]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radioelectronics*, 2019, iss. 4, pp. 16–21.
4. Mel'nik A.Yu. *Radiolokatsionnye metody issledovaniya Zemli* [Earth exploration radar methods]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 264 p.
5. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended radar targets]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1982. 232 p.
6. Tyrykin S.V., Kiselev A.V. [Adequacy of modeling by a matrix simulator of electromagnetic fields scattered by a point radar target]. *Izluhenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln: materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konfe-rentsii* [Proceedings of the All-Russian conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves"], Taganrog, 2001, pp. 27–31. (In Russian).
7. Sabitov T.I., Kiselev A.V. Imitatsiya ekhsignalov dvukhpozitsionnykh sistem s ispol'zovaniem kogerentnykh izluchatelei [Simulation of echo signals of two-position systems using coherent emitters]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radioelectronics*, 2019, iss. 4, pp. 42–46.
8. Sabitov T.I., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Simulating an object's altitude for two-position systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2020, vol. 59, no. 2, pp. 217–222.
9. Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I. *Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktional'nykh samoletov. T. 1. RLS – informatsionnaya osnova boevykh deistvii mnogofunktional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [Radar systems multipurpose aircraft. Vol. 1. Radar – information basis hostilities multipurpose aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 656 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Сабитов Тимур Ильясович – родился в 1996 году, магистрант, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: радиолокация, имитационное моделирование. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sti0@mail.ru).

Sabitov Timur Ilyasovich (b. 1996) – a graduate student at the department of radio receivers and radio transmitters, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on radiolocation and simulation modeling. He is author of 6 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sti0@mail.ru).

*Статья поступила 19 мая 2020 г.
Received May 19, 2020*

To Reference:

Sabitov T.I. Prostranstvenno-fazovaya fokusirovka izluchatelei matrichnogo imitatora na dve tochki priema [Spatial-phase focusing of matrix simulator radiators at two receiving points]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 60–67. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-60-67.

УДК 621.396.01

**НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ
БИФОКАЛЬНОГО ЛИНЗОВОГО КОЛЛИМАТОРА****М.А. Степанов, Ю.С. Никулина***Новосибирский государственный технический университет*

Рассматриваются условия физической реализуемости одной из разновидностей апланатических линзовых коллиматоров – бифокального линзового коллиматора, имеющего две точки идеальной фокусировки, не лежащих на главной оптической оси. На основе взаимосвязи параметров, задаваемых при проектировании бифокального линзового коллиматора (размер раскрытия, толщина, фокусное расстояние, расстояние от главной оптической оси до точки фокуса, наклон фазового фронта в раскрытии), сформулированы условия, выполнение которых необходимо для синтеза физически реализуемого коллиматора. Решение поставленной задачи базируется на свойствах эллипса равных краев и геометрии бифокального линзового коллиматора. Приводятся и анализируются графические зависимости полученных выражений. На основе этого анализа определена взаимная зависимость параметров, задаваемых в начале вычислений поверхности линзы. Записаны системы неравенств, устанавливающие условия реализуемости бифокального линзового коллиматора. Записан ряд ограничений на начальные параметры бифокального линзового коллиматора. Выполнение полученных в статье неравенств является необходимым условием физической реализуемости бифокального линзового коллиматора.

Ключевые слова: бифокальный линзовый коллиматор, эллипс равных краев, физическая реализуемость.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-68-78

Введение

Использование одноповерхностных асферических линзовых антенн в качестве коллиматора имеет существенный недостаток. Смещения облучателя из точки фокуса линзы в перпендикулярном к главной оптической оси направлении приводят к искажениям фазового фронта в ее раскрытии.

Апланатические линзовые коллиматоры позволяют осуществлять широкоугольное сканирование без искажения формы диаграммы направленности путем большого смещения облучателя из фокуса. Расчет апланатических линз достаточно полно рассмотрен в оптике [1, 2], апланатические линзовые коллиматоры рассмотрены в [3–5].

Одной из разновидностей апланатических линзовых коллиматоров являются бифокальные, которые рассматриваются в литературе [6–8].

Бифокальные линзовые антенны имеют две преломляющие поверхности и две симметричные точки идеальной фокусировки, расположенные не на главной оптической оси. При облучателе, расположенном в любой из этих двух точек, в раскрытии коллиматора получается плоский фазовый фронт, наклоненный на задаваемый на этапе расчета коллиматора угол $\pm\alpha$, который определяется относительно раскрытия линзового коллиматора.

Из литературы известен ряд методов построения поверхности бифокальных линзовых коллиматоров [9–12], однако они являются трудоемкими, приближенными и не всегда позволяют получить физически реализуемую поверхность линзового коллиматора.

Одна из проблем заключается в следующем. Геометрия коллиматора и возможности его физической реализуемости существенно зависят от таких параметров, как фокусное расстояние, размер апертуры антенны, расстояние от фокуса до главной оптической оси коллиматора, а также угол наклона фазового фронта относительно главной оптической оси в раскрыве линзы [9]. По сути, синтез любого бифокального линзового коллиматора начинается с задания этих параметров.

В литературе отмечается, что не всякий набор таких параметров позволяет получить набор точек, аппроксимирующих поверхности линзового коллиматора, и не всегда полученный набор точек позволяет реализовать физически реализуемую линзовую антенну [9]. Поэтому зачастую успех проектирования зависит от опыта проектировщика.

Однако рекомендаций ни по выбору конкретных значений величин, ни даже диапазона, в котором они могут лежать, в литературе не приводится. Это определяет цель настоящей работы: на основе взаимосвязи параметров, задаваемых при проектировании бифокального линзового коллиматора, сформулировать условия, выполнение которых необходимо для синтеза физически реализуемого коллиматора.

1. Теория

Синтез бифокальной линзы начинается с задания таких параметров, как фокусное расстояние X_B , размер апертуры антенны Y_B , расстояние от фокуса до главной оптической оси линзы a , а также угол наклона фазового фронта относительно главной оптической оси в раскрыве линзы α (рис. 1). Геометрия линзы и возможности ее физической реализуемости существенно зависят от этих параметров. Определим условия, накладываемые на перечисленные параметры и гарантирующие синтез коллиматора.

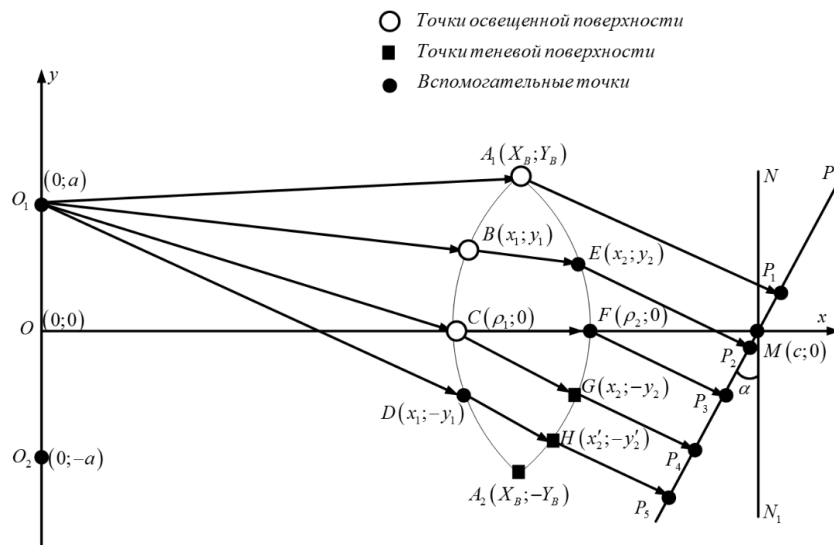


Рис. 1 – Геометрия бифокальной линзовой антенны
 Fig. 1 – Geometry of the bifocal lens antenna

Согласно [10], при построении бифокальной линзовой антенны необходимо, чтобы освещенная и теневая поверхности лежали по разные стороны от кривой эллипса равных краев:

$$x^2 + y^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha .$$

Так как кривая эллипса равных краев проходит через вершины линзы, то, подставив ее координаты, получаем уравнение

$$X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha. \quad (1)$$

Кроме того, кривая эллипса краев пересекает главную оптическую ось (ось x на рис. 1) в некоторой точке с координатами $(x, y) = (X_B + s, 0)$. Тогда из (1) получаем уравнение

$$(X_B + s)^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha, \quad (2)$$

где s – параметр, определяющий кривизну эллипса краев.

Используя уравнения (1) и (2), составляем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha; \\ (X_B + s)^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Получим зависимость угла наклона фазового фронта α от размера апертуры линзы Y_B , кривизны эллипса краев s и фокусного расстояния X_B .

Для этого раскроем скобки и перенесем одинаковые слагаемые по одну сторону каждого уравнения:

$$\begin{cases} Y_B^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2; \\ 2X_B s + s^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2. \end{cases}$$

Получаем уравнение

$$Y_B^2 \cos^2 \alpha = 2X_B \cdot s + s^2. \quad (4)$$

Отсюда выражаем α :

$$\alpha(X_B, Y_B, s) = \arccos \left(\frac{\sqrt{2X_B \cdot s + s^2}}{Y_B} \right). \quad (5)$$

Получим также зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси a от размера апертуры линзы Y_B , кривизны эллипса краев s и угла наклона фазового фронта α .

Для этого в (3) выразим X_B из первого уравнения и подставим во второе:

$$\begin{cases} X_B = \sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha}; \\ 2X_B \cdot s + s^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2. \end{cases}$$

Получим

$$2\sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha} \cdot s + s^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - \left(\sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha} \right)^2.$$

После раскрытия скобок и приведения подобных

$$2\sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha} \cdot s = Y_B^2 \cos^2 \alpha - s^2.$$

Возведем обе части уравнения в квадрат:

$$4s^2 \cdot a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - 4s^2 \cdot Y_B^2 \cos^2 \alpha = Y_B^4 \cos^4 \alpha - 2Y_B^2 \cdot s^2 \cos^2 \alpha + s^4.$$

И выразим a :

$$a = \frac{\sqrt{Y_B^4 \cos^4 \alpha + s^4 + 2s^2 Y_B^2 \cos^2 \alpha}}{2s \operatorname{ctg} \alpha} = \frac{\pm (Y_B^2 \cos^2 \alpha + s^2)}{2s \operatorname{ctg} \alpha}.$$

Таким образом, получаем зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси a от размера апертуры линзы Y_B , кривизны эллипса краев s и угла наклона фазового фронта α :

$$a(Y_B, \alpha, s) = \pm \frac{s^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha}{2s \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (6)$$

Определим из системы уравнений (3) зависимость кривизны эллипса краев от угла наклона фазового фронта, от размера апертуры линзы Y_B и фокусного расстояния X_B . Для этого решим уравнение (4) как квадратное уравнение через дискриминант:

$$\begin{aligned} s^2 + 2X_B \cdot s - Y_B^2 \cos^2 \alpha &= 0; \\ D &= (2X_B)^2 - 4 \cdot 1(-Y_B^2 \cos^2 \alpha) = 4(X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha); \\ x_{1,2} &= \frac{-2X_B \pm \sqrt{4(X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha)}}{2 \cdot 1} = -X_B \pm \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha}. \end{aligned}$$

Таким образом, получается, что кривизна эллипса равных краев зависит от угла наклона фазового фронта, от размера апертуры линзы Y_B и фокусного расстояния X_B :

$$s(X_B, Y_B, \alpha) = -X_B \pm \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha}. \quad (7)$$

2. Графические зависимости

Графически полученные зависимости показаны на рис. 2–5.

По полученным зависимостям (5)–(7) (рис. 2–5) можно сделать следующие выводы. При одинаковом фокусном расстоянии с увеличением диаметра и уменьшением кривизны эллипса равных краев происходит увеличение угла наклона фазового фронта и расстояния от главной оптической оси до фокуса. При идентичных углах наклона фазового фронта с увеличением диаметра линзы и уменьшением кривизны эллипса равных краев происходит увеличение расстояния от начала координат до вершины линзы X_B . При одинаковом расстоянии от главной оптической оси до фокуса с увеличением диаметра линзы и уменьшением кривизны эллипса равных краев происходит увеличение расстояния от начала координат до вершины линзы X_B .

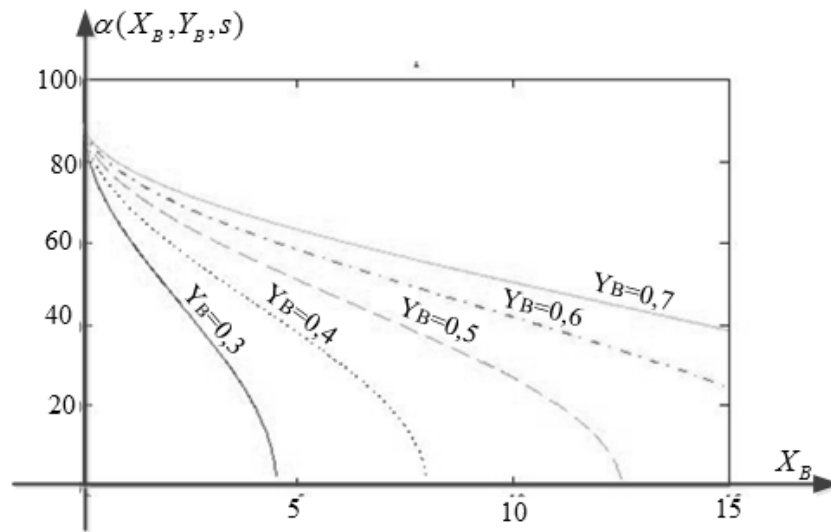


Рис. 2 – Зависимость угла наклона фазового фронта от кривизны линзы, фокусного расстояния и размера апертуры антенны $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $s = 0,01$ при различных размерах апертуры линзы Y_B (по выражению 4)

Fig. 2 – The dependence of the angle of the phase front inclination on the lens curvature, focal length and size of the antenna aperture $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $s = 0,01$ for various sizes of the Y_B lens aperture (according to expression 4)

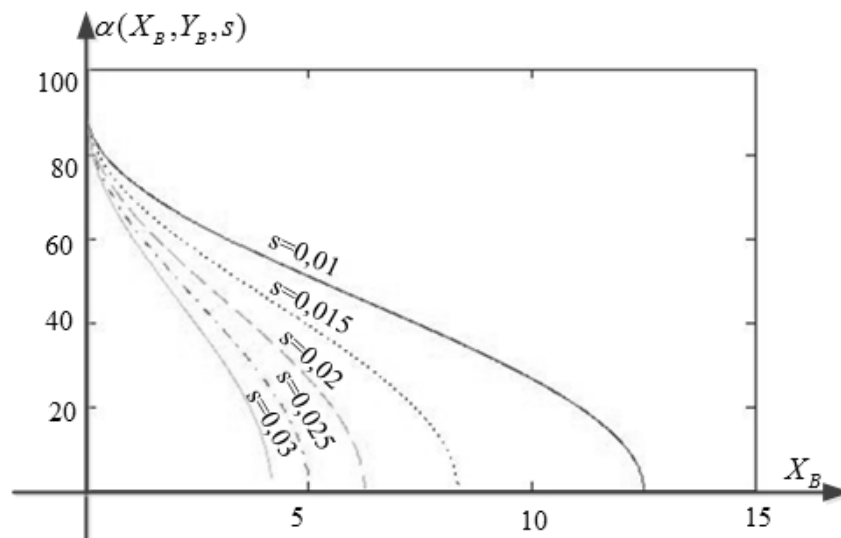


Рис. 3 – Зависимость угла наклона фазового фронта от размера апертуры антенны и кривизны эллипса краев, фокусного расстояния $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $Y_B = 0,5$ м при различных значениях кривизны эллипса краев s (по выражению 4)

Fig. 3 – Dependence of the angle of the phase front inclination on the antenna aperture size and the curvature of the ellipse of the edges, the focal length $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $Y_B = 0,5$ m for various values of the ellipse curvature of edges s (according to expression 4)

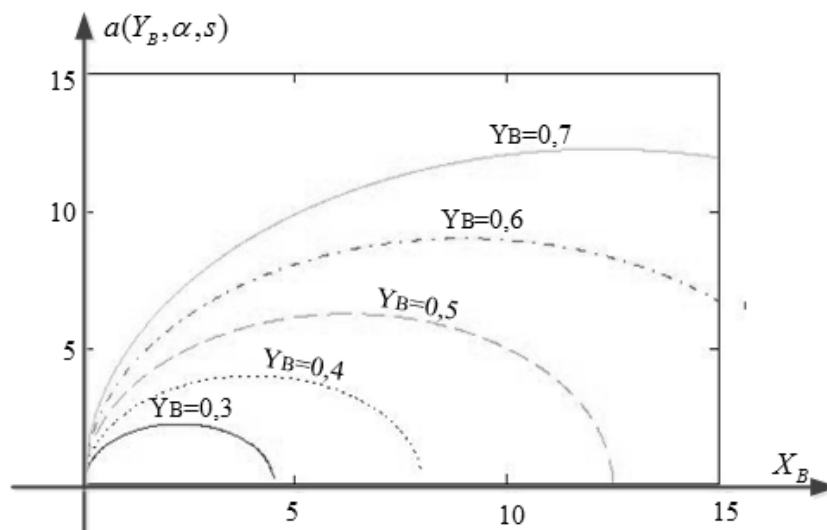


Рис. 4 – Зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси от радиуса и кривизны линзы, фокусного расстояния $\alpha(Y_B, a, s)$, $s = 0,01$, при различных размерах апертуры линзы Y_B (по выражению 5)
 Fig. 4 – Dependence of the distance from the irradiator to the main optical axis on the radius and curvature of the lens, focal length, $s = 0,01$, for various sizes of the lens aperture Y_B (according to expression 5)

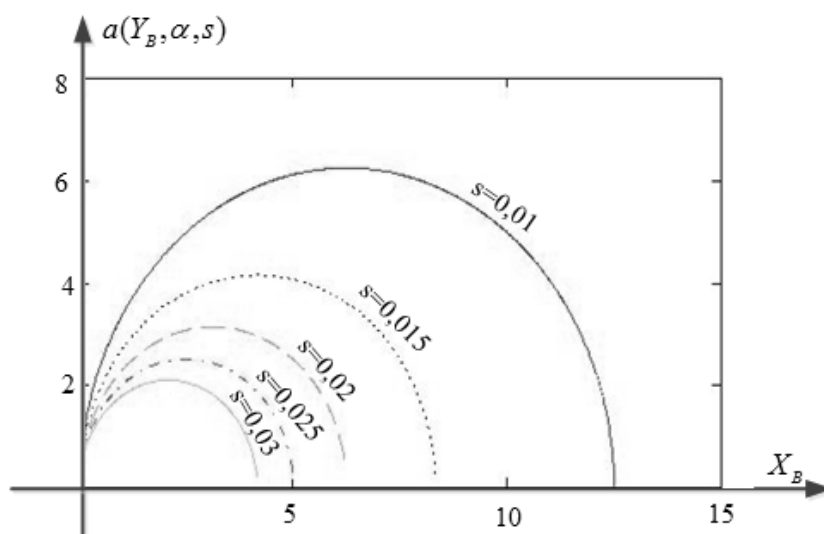


Рис. 5 – Зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси от радиуса и кривизны линзы, фокусного расстояния $\alpha(Y_B, a, s)$, $Y_B = 0,5$ м, при различных значениях кривизны эллипса краев s (по выражению 5)
 Fig. 5 – Dependence of the distance from the irradiator to the main optical axis on the radius and curvature of the lens, focal length $\alpha(Y_B, a, s)$, $Y_B = 0,5$ м, for various values of the ellipse curvature of edges s (according to expression 5)

Кривизна эллипса краев при одинаковых углах наклона фазового фронта с увеличением диаметра линзы возрастает. С увеличением углов наклона фазового фронта кривизна эллипса равных краев при равных размерах апертуры антенны крайне убывает.

Кривизна эллипса краев при одинаковых углах наклона фазового фронта или при одинаковых размерах апертуры антенны с увеличением фокусного расстояния и размера апертуры линзы возрастает.

3. Условия реализуемости бифокального линзового коллиматора

Полученные зависимости позволяют определить взаимную зависимость параметров, задаваемых в начале вычислений поверхности линзы.

Исходными параметрами, при проектировании линзового коллиматора являются: Y_B – координата вершины линзы (определяется размером апертуры исследуемой антенны); a – расстояние от главной оптической оси до точки фокуса (определяется требуемым диапазоном перемещения облучателя); X_B – фокусное расстояние (определяется размером радиобезэховой камеры). Свободными параметрами остаются α – угол наклона фазового фронта в раскрыте линзового коллиматора и s – параметр, определяющий кривизну. Они выбираются такими, чтобы выполнялись равенства (5) и (6).

Из геометрии линзы (рис. 1) следует ряд условий, накладываемых на исходные параметры и определяющих физическую реализуемость линзы [171].

Это означает, что координата вершины линзы ($x = X_B$), а также координаты точек освещенной и теневой поверхности (x_{1N} и x_{2N} соответственно) должны быть расположены между координатой облучателя ($x = 0$) и координатой исследуемой антенны ($x = c$).

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < X_B < c; \\ 0 < \rho_1 < a \operatorname{ctg} \alpha; \\ 0 < x_{1N} < a \operatorname{ctg} \alpha; \\ a \operatorname{ctg} \alpha < x_{2N} < c; \\ a \operatorname{ctg} \alpha < \rho_2 < c; \\ -Y_B < y_{1N} < Y_B; \\ -Y_B < y_{2N} < Y_B. \end{array} \right. \quad (8)$$

Точки освещенной и теневой поверхности также должны находиться в указанном диапазоне. Кроме того, как уже говорилось ранее, точки освещенной поверхности должны быть расположены по одну сторону от кривой эллипса равных краев ($a \operatorname{ctg} \alpha$), а точки теневой поверхности – по другую [10]. Координаты точек, освещенной и теневой поверхности (y_{1N} и y_{2N} соответственно) должны быть расположены между координатами вершин линзы ($y = Y_B$ и $y = -Y_B$).

Из уравнения эллипса равных краев следует, что должно выполняться неравенство

$$\frac{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2}{\cos^2 \alpha} \geq 0.$$

Это неравенство выполняется в случае, если

$$a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2 \geq 0.$$

Отсюда

$$-a \operatorname{ctg} \alpha \leq X_B \leq a \operatorname{ctg} \alpha. \quad (9)$$

Длины лучей физически реализуемой линзы не могут быть отрицательными. Отсюда следует ряд условий, определяющих начальные параметры бифокального линзового коллиматора.

Длину луча, проходящего из точки фокуса $O_1(0; a)$ через верхний край линзы с координатами $(X_B; Y_B)$, можно найти по выражению

$$O_1 A_1 = \sqrt{X_B^2 + (Y_B - a)^2}. \quad (10)$$

Длину другого луча, от края линзы с координатами $(X_B; Y_B)$ до точки, лежащей на поверхности фазового фронта (см. рис. 1), P_1 , можно найти по выражению

$$A_1 P_1 = (c - X_B + Y_B \operatorname{tg} \alpha) \cos \alpha. \quad (11)$$

Длина этого луча всегда будет положительна.

Отсюда

$$X_B < c + Y_B \cos \alpha, \quad \text{если} \quad \cos \alpha > 0 \left(\alpha \in \left(-\frac{\pi n}{2}; \frac{\pi n}{2} \right), n \in Z \right), \quad (12)$$

$$X_B > c + Y_B \cos \alpha, \quad \text{если} \quad \cos \alpha < 0 \left(\alpha \in \left(\frac{\pi n}{2}; \frac{3\pi n}{2} \right), n \in Z \right). \quad (13)$$

Длина луча CG определяется из геометрии линзы:

$$CG(\rho_1, x_2) = \frac{x_2 - \rho_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{\rho_1 n} \right)^2}} > 0.$$

Отсюда следует, что

$$-\rho_1 n < a < \rho_1 n. \quad (14)$$

Выражения, описывающие лучи GP_4 , EP_2 и HP_5 , записывают исходя из того, что фазовый фронт должен быть перпендикулярен лучам:

$$GP_4(x_2, y_2) = \cos \alpha (c - x_2) + \sin(\alpha) y_2 > 0;$$

$$EP_2 = |\cos \alpha (c - x_2) - \sin(\alpha) y_2|;$$

$$HP_5(x'_2, y'_2) = |\cos \alpha (c - x'_2) - \sin(\alpha) y'_2|.$$

Отсюда следующее ограничение:

$$c > x_2 + \operatorname{tg}(\alpha) y_{2N}.$$

Так как y_{2N} лежит в пределах от $-Y_B$ до Y_B , следовательно,

$$\begin{cases} c > x_2 + \operatorname{tg}(\alpha)Y_B, & \text{если } \operatorname{tg} \alpha > 0 \left(\alpha \in \left(\pi n; \frac{\pi}{2} + \pi n \right), n \in Z \right); \\ c > x_2 - \operatorname{tg}(\alpha)Y_B, & \text{если } \operatorname{tg} \alpha < 0 \left(\alpha \in \left(\frac{\pi}{2} + \pi n; \pi + \pi n \right), n \in Z \right). \end{cases} \quad (15)$$

Заключение

Определены неравенства, устанавливающие условия реализуемости бифокального линзового коллиматора. Записан ряд ограничений (8) – (15) на начальные параметры бифокальной линзовой антенны (фокусное расстояние, расстояние от облучателя до главной оптической оси, угол наклона фазового фронта).

Выполнение неравенств является необходимым условием физической реализуемости бифокального линзового коллиматора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Martin L.C.** Wide-aperture aplanatic single lenses // Proceedings of the Physical Society. – 1944. – Vol. 56, N 2. – P. 104–113.
2. **Wassermann G., Wolf E.** On the theory of aplanatic aspheric systems // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1942. – Vol. 62. – P. 2–8.
3. **Sternberg R.L.** Successive approximation and expansion methods in the numerical design of microwave dielectric lenses // Journal of Mathematics and Physics. – 1955. – Vol. 34, N 1–4. – P. 209–235.
4. **Friedlander F.G.** A dielectric-lens aerial for wide-angle beam scanning // Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part IIIA: Radiolocation. – 1946. – Vol. 93, N 4. – P. 658–662.
5. **Bekefi G., Farnell G.W.** A homogeneous dielectric sphere as a microwave lens // Canadian Journal of Physics. – 1956. – Vol. 34 (8). – P. 790–803.
6. High-efficiency dual-band bifocal metalens based on reflective metasurface / R. Xie, Y. Liu, T. Wang, G. Zhai, J. Gao, J. Ding // 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2019): Proceedings. – Shanghai, China, 2019. – P. 1–3.
7. **Калошин В.А., Нгием Х.Д.** Синтез и анализ диэлектрических бифокальных линз // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 8. – С. 1–15.
8. Сканирующая тороидально-бифокальная линзовая антенная система диапазона 57–64 ГГц / А.А. Мальцев, В.М. Селезнев, А.С. Рульков, О.В. Болховская // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 36–47.
9. **Жук М.С., Молочков Ю.Б.** Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
10. **Зелкин Е.Г., Петрова Р.А.** Линзовые антенны. – М.: Советское радио, 1974. – 280 с.
11. **Brown R.** Dielectric bifocal lenses // 1958 IRE International Convention Record. – 1956. – Vol. 4. – P. 180–187.
12. Bifocal wide angle lens with optimized construction algorithm for 60 GHz / H. Gulan, S. Marahrens, C. Rusch, B. Goettel, T. Zwick // 2014 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Applications (iWAT). – Sydney, NSW, Australia, 2014. – P. 43–46.

**NECESSARY CONDITIONS OF PHYSICAL REALIZABILITY
OF THE BIFOCAL LENS COLLIMATOR****Stepanov M.A., Nikulina Yu.S.***Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The conditions of physical realizability of one of the varieties of aplanatic lens collimators, a bifocal lens collimator, which has two points of perfect focus and do not lie on the main optical axis, are considered. Based on the relationship of the parameters specified during the design of the bifocal lens collimator (aperture size, thickness, focal length, distance from the main optical axis to the focal point, tilt of the phase front in the aperture), conditions that are necessary for the synthesis of a physically feasible collimator are formulated. The solution of this problem is based on the properties of an ellipse of equal edges and the geometry of a bifocal lens collimator. The graphic dependencies of the obtained expressions are given and analyzed. Based on this analysis, the mutual dependence of the parameters specified at the beginning of the calculation of the lens surface is determined. Systems of inequalities that establish the conditions for the realizability of a bifocal lens collimator are written. A number of restrictions on the initial parameters of the bifocal lens collimator are recorded. The fulfillment of the inequalities obtained in the article is a necessary condition for the physical realizability of the bifocal lens collimator.

Keywords: bifocal lens collimator, ellipse of equal edges, physical realizability.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-68-78

REFERENCES

1. Martin L.C. Wide-aperture aplanatic single lenses. *Proceedings of the Physical Society*, 1944, vol. 56, no. 2, pp. 104–113.
2. Wassermann G., Wolf E. On the theory of aplanatic aspheric systems. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1942, vol. 62, pp. 2–8.
3. Sternberg R.L. Successful approximation and expansion methods in the numerical design of microwave dielectric lenses. *Journal of Mathematics and Physics*, 1955, vol. 34, no. 1–4, pp. 209–235.
4. Friedlander F.G. A dielectric-lens aerial for wide-angle beam scanning. *Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part IIIA: Radiolocation*, 1946, vol. 93, no. 4, pp. 658–662.
5. Bekefi G., Farnell G.W. A homogeneous dielectric sphere as a microwave lens. *Canadian Journal of Physics*, 1956, vol. 34 (8), pp. 790–803.
6. Xie R., Liu Y., Wang T., Zhai G., Gao J., Ding J. High-efficiency dual-band bifocal metalens based on reflective metasurface. *2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2019)*, Shanghai, China, 2019, pp. 1–3.
7. Kaloshin V.A., Ngiem H.D. Sintez i analiz dielektricheskikh bifokal'nykh linz [Synthesis and analysis of dielectric bifocal lenses]. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*, 2018, no. 8, pp. 1–15.
8. Maltsev A.A., Seleznev V.M., Rulkov A.S., Bolkhovskaya O.V. Skaniruyushchaya toroidal'no-bifokal'naya linzovaya antennaya sistema diapazona 57–64 GGts [Steerable toroidal bifocal lens-array antenna in 57–64 GHz range]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 36–47.
9. Zhuk M.S., Molochkov Yu.B. *Proektirovanie linzovykh, skaniruyushchikh, shirokodiapazonnykh antenn i fidernykh ustroystv* [Design of lens, scanning, wide-range antennas and feeder devices]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 440 p.
10. Zelkin E.G., Petrova R.A. *Linzovye anteny* [Lens antennas]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 280 p.
11. Brown R. Dielectric bifocal lenses. *1958 IRE International Convention Record*, 1956, vol. 4, pp. 180–187.
12. Gulan H., Marahrens S., Rusch C., Goettel B., Zwick T. Bifocal wide angle lens with optimized construction algorithm for 60 GHz. *2014 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Ap-plications (iWAT)*, Sydney, NSW, Australia, 2014, pp. 43–46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Степанов Максим Андреевич – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование сложной радиолокационной обстановки в реальном масштабе времени. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich, Doctor of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor of the department of radio receivers and radio transmitting devices in the Novosibirsk State Technical University. His research interests include real-time modeling of complex radar conditions. He has published over 80 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).



Никулина Юлия Сергеевна – аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: синтез диэлектрических линзовых коллиматоров. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: julija.wo@mail.ru).

Nikulina Julia Sergeevna, a graduate student at the Department of Radio and Radio Transmitting Devices in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include synthesis of dielectric lens collimators. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: julija.wo@mail.ru).

Статья поступила 28 мая 2020 г.

Received May 28, 2020

To Reference:

Stepanov M.A., Nikulina Yu.S. Neobkhodimye usloviya fizicheskoi realizuемости bifokal'nogo linzovogo kollimatora [Necessary conditions of physical realizability of the bifocal lens collimator]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 68–78. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-68-78.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 1-2 (46-47) январь–июнь 2020

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 17.06.2020. Выход в свет 19.06.2020. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 7,0. Печ. л. 5,0. Изд. № 145. Заказ № 842. Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20