ISSN 1727-2769

АН ВШ РФ

ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 4 (49)
ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ
2020

Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 № 90-р):

Физико-математические науки

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Технические науки

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

01.04.10 – Физика полупроводников

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу http://journals.nstu.ru/doklady/rules. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2020 октябрь–декабрь № 4 (49)

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. Клымаш, 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 ПИ № 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. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2020 г.

S C I E N T I F I C J O U R N A L

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2020 October–December № 4 (49)

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 Prospekt, 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

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2020 октябрь–декабрь № 4 (49)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Елшин А.И., Кожухов В.В., Елшин П.А.
Расчет параметров схемы замещения индуктивно-кондуктивного нагревателя 7

Зима Д.Н., Соколова Д.О., Спектор А.А.
Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов на основе модели линейного предсказания 17

Липатов Н.В.
Влияние теплового удара на прочностные свойства горных пород: экспериментальное исследование термической усталостной прочности 32

Петров Н.И., Антонова Т.Л.
Повышение удельного импульса ионного двигателя
зонной инженерией твердотельного полевого катода 41

Чехонадских А.В.
Область стабилизации нелинейной модели синхронного
генератора с ПИДД$_2$-регулятором возбуждения 51

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES

2020 October–December № 4 (49)

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Elshin A.I., Kozhukhov V.V., Elshin P.A.
Calculation of substitution scheme parameters
inductive-conductive heater 7

Zima D.N., Sokolova D.O., Spector A.A.
Spatiotemporal processing of broadband signals
based on the linear prediction model.....17

Lipatov N.V.
Influence of heat shock on the strength properties of rocks:
an experimental study of thermal fatigue strength 32

Petrov N.I., Antonova T.L.
Increasing the specific impulse of the ion engine
by zone engineering of the solid-state field cathode 41

Chekhonadskikh A.V.
Stability area of a synchronous generator nonlinear model
with multiparametric excitation controller 51

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2020 октябрь–декабрь № 4 (49)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.537.85

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ИНДУКТИВНО-КОНДУКТИВНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

А.И. Елшин[1], В.В. Кожухов[2], П.А. Елшин[3]
[1]*Арктический государственный агротехнологический университет*
[2]*Новосибирский государственный технический универсистет*
[3]*ООО «Сибполимерстрой»*

Для уменьшения производственных затрат при проектировании и создании индуктивно-кондуктивного нагревателя (ИКН) необходимо как можно точнее провести предварительный расчет. Это возможно при использовании наиболее приближенной электрической схемы замещения ИКН к реальному объекту. Появляется возможность оценить работу ИКН в различных эксплутационных условиях, в том числе аварийных, с помощью более простого моделирования. Индуктивно-кондуктивный нагреватель трансформаторного типа представляет из себя трехстержневой Ш-образный магнитопровод с первичными обмотками, которые охвачены теплообменником (ТО) из трех концентрических систем электропроводящих цилиндров с внутренним щелевым каналом для теплоносителя. Энергия от питающей сети с помощью первичной обмотки передается в теплообменник через воздушный промежуток ***индуктивным*** способом. Вторичная цепь электромагнитного устройства является теплообменником, в котором электрическая энергия преобразуется в тепловую. Тепловой поток от разогретых цилиндрических стенок ТО ***кондуктивным*** путем нагревает циркулирующий в системе теплоноситель до необходимой температуры. Большая площадь поверхности ТО позволяет избежать его перегрева по отношению к теплоносителю, что положительно сказывается при эксплуатации ИКН в системах отопления и горячего водоснабжения, значительно уменьшая отложения примесей воды на стенках ТО. Увеличивается срок службы устройства до 100 тыс. часов и более. В работе проведено синтезирование элементов схемы замещения ИКН и представлены результаты расчета характеристик стационарного режима ряда изделий. Схема замещения позволяет моделировать электромагнитные процессы в устройствах различной мощности, напряжения и промышленных частот в диапазоне 50…1000 Гц. В случае изменения конфигурации камеры нагрева (вторичной цепи) производится корректировка параметров элементов схемы замещения без изменения общего алгоритма построения. Для новых изделий индуктивно-кондуктивного нагрева отсутствуют какие-либо библиографические данные для расчета элементов схемы замещения, особенно в части формирования схемы замещения вторичной цепи, определяемой конструктивным исполнением камеры нагрева. Для восполнения этого пробела авторами проделана настоящая работа.

Ключевые слова: индуктивно-кондуктивный нагреватель, схема замещения, алгоритм расчета.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-7-16

Введение

Электрическая схема замещения реального индуктивно-кондуктивного нагревателя (ИКН) позволяет провести исследование характеристик устройства любой мощности без производственных затрат на создание опытного экземпляра. Упрощается моделирование различных эксплуатационных стационарных режимов работы изделия и появляется возможность прогнозирования условий функционирования ИКН в различных аварийных ситуациях.

В целом, построение схемы замещения ИКН осуществлено на базе общеизвестных существующих методик, приведенных в [1–6] с введением дополнитель-

© 2020 А.И. Елшин, В.В. Кожухов, П.А. Елшин

ных определений [7], присущих данному типу устройств, что позволяет провести расчет и моделирование индуктивно-кондуктивного нагревателя с оптимальными массостоимостными показателями.

1. Основы построения схемы замещения

Общий вид схемы замещения фазы индуктивно-кондуктивного нагревателя представлен на рис. 1.

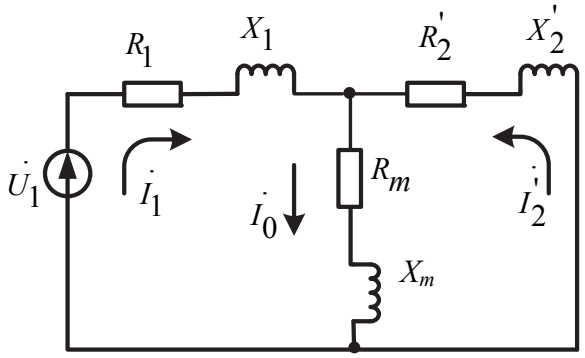


Рис. 1 – Схема замещения фазы индуктивно-кондуктивного нагревателя

Fig. 1 – Phase replacement diagram of an inductive-conductive heater

По известным основным размерам ИКН и обмоточным данным определяются:

– активное сопротивление первичной обмотки R_1;

– активное сопротивление теплообменника R_2;

– индуктивное сопротивление рассеяния обмотки X_1 и теплообменника X_2.

Основные и добавочные потери в стали P_m позволят отыскать активную составляющую сопротивления поперечной ветви схемы замещения R_m. Реактивное сопротивление поперечной ветви X_m рассчитывается на основании падения магнитного напряжения, обусловленного величиной намагничивающей силы.

Трехфазный индуктивно-кондуктивный нагреватель (рис. 2) содержит трехстержневой Ш-образный магнитопровод *1* с первичными обмотками *2*, на которые помещен теплообменник *3* (ТО) из трех концентрических систем электропроводящих цилиндров, образующих щелевой канал для теплоносителя, и объединенных в одну систему через присоединительные патрубки *4*.

Теплообменник отделен от первичной обмотки воздушным промежутком, через который ***индуктивным*** способом передается энергия от питающей сети. ТО является вторичной цепью электромагнитного устройства, в котором происходит преобразование электроэнергии в теплоту. Тепловой поток от цилиндрических стенок ТО ***кондуктивным*** путем нагревает циркулирующий в системе теплоноситель до необходимой температуры. Благодаря развитой теплоотдающей поверхности ТО перегрев стенок по отношению к теплоносителю незначителен, что благоприятно сказывается на функционировании устройства в системах отопления и горячего водоснабжения без отложений примесей воды на стенках ТО. Это увеличивает срок службы устройства до 100 тыс. часов и более.

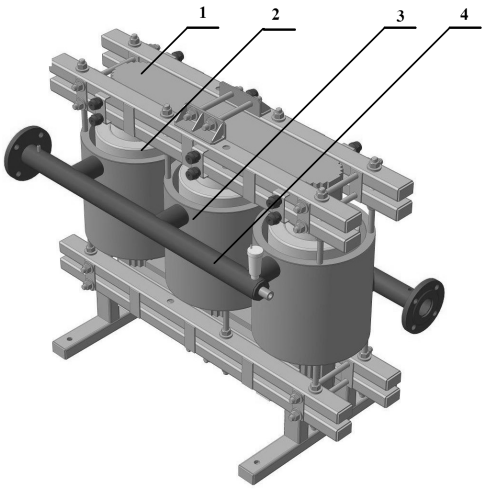


Рис. 2 – Общий вид трехфазного индуктивно-кондуктивного нагревателя

Fig. 2 – General view of a three-phase inductive-conductive heater

Кроме того, двойная изоляция напряжения сети и низкий электрический потенциал прикосновения к ТО (не более 2 В) делает устройство электробезопасным на уровне второго класса, расширяя области его применения.

Исходными данными к синтезу параметров схемы замещения фазы ИКН являются следующие.

Мощность на фазу P, кВт.

Напряжение сети фазное U, В.

Коэффициент ЭДС k_e.

Частота сети f, Гц.

Индукция магнитного потока стержня магнитопровода B_m, Т.

Удельное электрическое сопротивление обмоточного провода ρ_o, Ом · м.

Удельное электрическое сопротивление ТО ρ_t, Ом · м.

Диаметр стержня магнитопровода d, м.

Масса электротехнической стали на фазу G_{fe}, кг.

Зазор между магнитопроводом и обмоткой ε, м.

Внутренний диаметр обмотки D, м.

Толщина обмотки b, м.

Сечение провода обмотки $s_{пр}$, м^2.

Внешний диаметр обмотки D_1, м.

Зазор между обмоткой и ТО δ, м.

Внутренний диаметр теплообменника D_2, м.

Толщина стенки ТО a, м.

Внешний диаметр первого цилиндра теплообменника D_3, м.

Ширина щелевого канала для теплоносителя c, м.

Внутренний диаметр второго цилиндра теплообменника D_4, м.

Внешний диаметр второго цилиндра теплообменника D_5, м.

Высота теплообменника h, м.

Число витков фазы W.

2. Расчет параметров схемы замещения

Активное сопротивление обмотки

$$R_1 = \rho_o W \pi \frac{D + D_1}{2 s_{пр}}.$$

Активное сопротивление внутреннего цилиндра теплообменника

$$R_{21} = \rho_t \pi \frac{D_2 + a/2}{ah}.$$

Активное сопротивление торцевых крышек теплообменника

$$R_{22} = \rho_t \pi \frac{1}{a \ln\left(\frac{D_4}{D_3}\right)}.$$

Активное сопротивление внешнего цилиндра теплообменника

$$R_{23} = \rho_t \pi \frac{D_4 + a/2}{ah}.$$

Активное сопротивление теплообменника

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_{23}}}.$$

Приведенное активное сопротивление теплообменника

$$R_2' = R_2 W^2.$$

Индуктивные сопротивления короткого замыкания.

Параметры расчетных зон магнитного поля рассеяния:

$$x_1 = b\left(\frac{D}{3} + \frac{b}{4}\right),$$

$$x_2 = \delta\left(D_1 + \frac{\delta}{2}\right),$$

$$x_3 = a\left(7\frac{D_2}{12} + 11\frac{a}{48}\right),$$

$$x_4 = \frac{c}{4}\left(D_3 + \frac{c}{2}\right),$$

$$x_5 = b\left(\frac{D_4}{3} + \frac{a}{4}\right).$$

Соотношение расчетных зон первичной и вторичной цепей

$$k = \frac{x_1 + \frac{x_2}{2}}{\frac{x_2}{2} + x_3 + x_4 + x_5}.$$

Ширина зоны потоков рассеяния

$$\tau = 2a + b + c + \delta.$$

Коэффициент соотношения

$$u = \frac{h}{\tau}.$$

Коэффициент Роговского

$$\rho_1 = 1 - \frac{1}{\pi u}(1 - e^{-\pi u}).$$

Приведенная длина силовых линий потоков рассеяния

$$L = \frac{h}{\rho_1}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки

$$X_1 = \frac{2\pi^2 f \mu_0 W^2}{L}\left(x_1 + \frac{x_2}{2}\right),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

Индуктивное сопротивление рассеяния теплообменника

$$X_2 = \frac{2\pi^2 f \mu_0}{L}\left(\frac{x_2}{2} + x_3 + x_4 + x_5\right).$$

Приведенное индуктивное сопротивление теплообменника

$$X_2' = X_2 W^2.$$

Сопротивления холостого хода.

Удельные потери в электротехнической стали магнитопровода

$$p_c = p_{co}\left(\frac{B_m}{1,5}\right)^2\left(\frac{f}{50}\right),$$

где p_{co} – удельные потери в стали при индукции 1,5 Т.

Потери энергии в магнитопроводе

$$P_c = p_c G_{fe}.$$

Активное сопротивление схемы замещения

$$R_m = \frac{(Uk_e)^2}{P_c}.$$

Средняя магнитная проницаемость стали магнитопровода

$$\mu_r = \frac{B_m}{H},$$

где H – напряженность магнитного поля в магнитопроводе, определяемое по основной кривой намагничивания стали.

Магнитное сопротивление магнитопровода

$$R_c = \frac{L_c}{\mu_r \cdot S_c},$$

где L_c, S_c – длина и площадь сечения магнитопровода.

Магнитное сопротивление воздушных зазоров магнитопровода

$$R_\delta = \frac{L_\delta}{\mu_0 S_\delta},$$

где L_δ, S_δ – длина и площадь сечения воздушных зазоров.

Индуктивное сопротивление намагничивающей цепи

$$X_m = \omega W^2 \frac{1}{R_c + R_\delta}.$$

Здесь $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

3. Апробация работоспособности схемы замещения ИКН

Проведем расчет характеристик стационарного режима по схеме замещения ИКН на фазу.

Полное сопротивление схемы замещения в комплексно-символической форме

$$Z_1 = R_1 + j \cdot X_1 + \frac{1}{\dfrac{1}{R_2' + j \cdot X_2'} + \dfrac{1}{R_m + j \cdot X_m}}.$$

Входной ток

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}.$$

Коэффициент мощности индуктивно-кондуктивного нагревателя

$$\cos\varphi = \frac{\mathrm{Re}(I_1)}{|I_1|}.$$

Полная мощность, потребляемая нагревателем,

$$S_1 = \dot{U}\,\overline{I_1}.$$

Активная мощность, потребляемая нагревателем,

$$P_1 = \mathrm{Re}(S_1).$$

Приведенная ЭДС вторичной цепи схемы замещения

$$E_2' = U - I_1(R_1 + jX_1).$$

Коэффициент ЭДС

$$k_e = \frac{E_2'}{U}.$$

Приведенный ток вторичной цепи

$$I_2' = \frac{E_2'}{Z_2'}.$$

Полный ток вторичной цепи

$$i_2 = \left|I_2'\right| \cdot W.$$

Активная мощность ИКН

$$P_2 = \mathrm{Re}(E_2' \cdot \overline{I}_2').$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

В таблице приведены параметры схемы замещения ряда типоразмеров трехфазных ИКН, полученных по изложенной выше методике расчета. Расчетные данные хорошо согласуются с результатами производственных испытаний типоразмеров индуктивно-кондуктивных нагревателей, представленных ниже.

Характеристики стационарного режима трехфазных ИКН

Characteristics of the stationary mode of three-phase inductive-conductive heater

Мощность, кВт Параметр	15	20	50	80	150
Исходные величины					
Индукция в сердечнике B_m, Т	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6
Диаметр внутренний обмотки D, мм	72	77	95	102	115
Высота обмотки h, мм	300	340	425	520	630
Толщина обмотки b, мм	10,4	11,5	14,1	15,3	17,3
Толщина стенки теплообменника a, мм	2,1	2,2	2,3	2,5	2,8
Зазор δ, мм	7	9	13	15	16
Ширина кольцевого канала c, мм	6	8	9	10	12
Число витков W	215	181	116	90	68
Масса магнитопровода G_{fe}, кг	40	50	95	140	210
Параметры схемы замещения					
Активное сопротивление обмотки R_1, Ом	0,183	0,106	0,031	0,016	0,007
Активное приведенное сопротивление теплообменника R_2', Ом	10,4	6,789	2,717	1,74	0,978
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки X_1, Ом	0,113	0,089	0,051	0,03	0,018
Индуктивное приведенное сопротивление рассеяния теплообменника X_2', Ом	0,121	0,099	0,056	0,031	0,018
Активное сопротивление намагничивающей ветви R_c, Ом	2700	1950	960	540	380

Окончание таблицы / The End Table

Мощность, кВт Параметр	15	20	50	80	150
Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви X_m, Ом	412	285	134	78	45
Ток первичной обмотки I_1, А	20,9	32,0	80,2	125,7	223,8
Ток теплообменника I_2, А	4470	5770	9275	11270	15170
Потребляемая мощность P_1, кВт	15,8	21,1	52,9	82,8	153,0
Электрический КПД	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99
Cos φ	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Коэффициент ЭДС k_e	0,982	0,984	0,988	0,99	0,992
ЭДС витка e, В	1,09	1,25	1,95	2,53	3,36

Выводы

Схема замещения, созданная по общеизвестным методикам с учетом специфических особенностей конструктивного построения индуктивно-кондуктивных нагревателей промышленной частоты, может быть использована для моделирования электромагнитных процессов в устройствах различной мощности, напряжения и промышленных частот в диапазоне 50…1000 Гц. При отличающейся конфигурации камеры нагрева (вторичной цепи) необходима корректировка параметров элементов схемы замещения без изменения общего алгоритма построения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
2. **Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия, 1974. – 504 с.
3. **Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А.** Проектирование электрических машин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
4. Трансформаторы силовые общего назначения до 35 кВ включительно. Технический справочник. – М.: Стандартэлектро, 1993.
5. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. – М.: Энергия, 1968. – 456 с.
6. **Туровский Я.** Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
7. **Елшин А.И.** Конструкции и расчет трансформаторных устройств низкотемпературного нагрева для жизнеобеспечения человека: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 140 с.

CALCULATION OF SUBSTITUTION SCHEME PARAMETERS INDUCTIVE-CONDUCTIVE HEATER

Elshin A.I.[1], Kozhukhov V.V.[2], Elshin P.A.[3]
[1]*Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia*
[2]*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[3]*OOO "Sibpolimerstroy", Novosibirsk, Russia*

To reduce production costs in the design and creation of an inductive-conductive heater (ICH), it is necessary to carry out a preliminary calculation as accurately as possible. This is possible when using the most approximate electrical circuit for replacing the ICH to a real object.

It becomes possible to assess the work of the ICH in various operating conditions, including emergency conditions, using simpler modeling. An inductive-conductive heater transformer-type is a three-rod W-shaped magnetic circuit with primary windings, which are covered by a heat exchanger (HE) of three concentric systems of electrically conductive cylinders with an internal slotted channel for the coolant. The energy from the mains supply is inductively transferred to the heat exchanger through the air gap by means of the primary winding. The secondary circuit of an electromagnetic device is a heat exchanger in which electrical energy is converted into heat. The heat flux from the heated cylindrical walls of the HE conductively heats the coolant circulating in the system to the required temperature. The large surface area of the HE allows you to avoid its overheating in relation to the coolant, which has a positive effect during the operation of the ICH in heating and hot water supply systems, significantly reducing the deposition of water impurities on the walls of the HE. The service life of the device is increased to 100 thousand hours or more. In the work, the synthesis of elements of the ICH equivalent circuit is carried out and the results of calculating the characteristics of the stationary mode of a number of products are presented. The equivalent circuit allows you to simulate electromagnetic processes in devices of different power, voltage and industrial frequencies in the range of 50…1000 Hz. If the configuration of the heating chamber (secondary circuit) is changed, the parameters of the elements of the equivalent circuit are adjusted without changing the general construction algorithm. For new products of inductive-conductive heating, there are no bibliographic data for calculating the elements of the equivalent circuit, especially regarding the formation of the replacement circuit of the secondary circuit, determined by the design of the heating chamber. To fill this gap, the authors have done this work.

Key words: inductive-conductive heater, equivalent circuit, calculation algorithm.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-7-16

REFERENCES

1. Leites L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 392 p.
2. Dombrovskii V.V., Khutoretskii G.M. *Osnovy proektirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka* [The basics of designing electric AC machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 504 p.
3. Sergeev P.S., Vinogradov N.V., Goryainov F.A. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing electric machines]. 3rd. ed. Moscow, Energiya Publ., 1969. 632 p.
4. *Transformatory silovye obshchego naznacheniya do 35 kV vklyuchitel'no. Tekhnicheskii spravochnik* [Power transformers of general purpose up to 35 kV inclusive. Technical handbook]. Moscow, Standartelektro Publ., 1993.
5. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Transformers calculating]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 456 p.
6. Turovskii Ya. *Elektromagnitnye raschety elementov elektricheskikh mashin* [Electromagnetic calculations of elements of electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 200 p.
7. Elshin A.I. *Konstruktsii i raschet transformatornykh ustroistv nizkotemperaturnogo nagreva dlya zhizneobespecheniya cheloveka* [Designs and calculation of transformer low-temperature heating devices for human life support]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 140 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Елшин Анатолий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение в АПК» ФГБОУ ВО Арктический ГАТУ. Опубликовано более 140 работ в области электромеханики и электротехнологии. (Адрес: 677007, Россия, г. Якутск, Сергеляхское шоссе, 3 км, д. 3. E-mail: elhin46@mail.ru).

Elshin Anatoly Ivanovich – Doctor of Sciences (Eng.), professor of the Department of Power Supply in the Agro-Industrial Complex of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Arctic GATU. More than 140 scientific papers have been published. (Address: Sergelyakhskoe highway, 3 km, building 3, 353907, Russia, Yakutsk. E-mail: elshin46@mail.ru).

Кожухов Вячеслав Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники НГТУ. Опубликовано более 30 работ в области силовой электроники и электротехнологии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kozhuxov@corp.nstu.ru).

Kozhukhov Vyacheslav Victorovich – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronics and Electrical Engineering, NSTU. More than 30 papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., 630073, Russia, Novosibirsk. E-mail: kozhuxov@corp.nstu.ru).

Елшин Петр Анатольевич – инженер по производству ООО «Сибполимерстрой». Опубликовано 8 работ в области электротехнологии. (Адрес: 630096, Россия, г. Новосибирск, ул. Станционная, 38, к. 28а. E-mail: elshin@ngs.ru).

Elshin Petr Anatolievich – Production engineer at SibPolymerStroy LLC. 8 scientific papers have been published. (Address: St. Station, 38, k. 28a, Novosibirsk, Russia, 630096. E-mail: elshin@ngs.ru).

Статья поступила 23 ноября 2020 г.
Received November 23, 2020

To Reference:

Elshin A.I., Kozhukhov V.V., Elshin P.A. Raschet parametrov skhemy zameshcheniya induktivno-konduktivnogo nagrevatelya [Calculation of substitution scheme parameters inductive-conductive heater]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 7–16. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-7-16

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2020 октябрь–декабрь № 4 (49)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.391, 621.396,519.254

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ*

Д.Н. Зима, Д.О. Соколова, А.А. Спектор
Новосибирский государственный технический университет

Основные разработки в области радиолокационных систем обзора направлены на исследование их функционирования с учетом влияния различных факторов, как, например, воздействия помех. Наиболее важным представляется обнаружение широкополосного сигнала, позволяющего увеличить разрешающую способность по дальности и скорости. При этом возникают проблемы подавления широкополосных помех существующими способами. В работе развиваются методы обработки широкополосных сигналов в условиях действия активных помех применительно к использованию в системах с различными вариантами пространственно-временных антенных элементов, в частности на примере линейных антенных решеток. Подход основан на представлении сигналов и помех, регистрируемых цифровой антенной решеткой, в виде многомерных пространственно-временных процессов, т. е. функций пространственной и временной координат. Это обусловлено как пространственным распределением элементов антенной решетки, так и пространственным распределением помех. Байесовский обнаружитель сигнала является оптимальным алгоритмом и обладает наилучшими характеристиками, но при этом крайне сложна его практическая реализация, осуществляемая в области пространственно-временных координат. Исследуемые алгоритмы обработки строятся на основе модели линейного предсказания, т. е. путем использования модели марковского случайного процесса для описания помехи на пространственно-распределенных антенных элементах. Особое внимание уделяется разработке алгоритмов, реализуемых при ограниченных вычислительных ресурсах и работе в реальном времени, что представляет собой проблему статистических методов обработки сигналов.

Ключевые слова: пространственно-временной сигнал, широкополосный сигнал, активные помехи, марковский случайный процесс, байесовская обработка, радиолокационные системы, цифровая антенная решетка.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-17-31

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются методы широкополосной радиолокации. Широкополосные сигналы используют для обзора радиолокационной обстановки, в системах охраны, в системах передачи информации [1]. Это обусловлено необходимостью повышения разрешающей способности радиолокационных систем (РЛС) для измерения координат, разрешения целей по дальности и скорости, распознавания пространственно-распределенных целей. К широкополосным сигналам можно отнести и шумовые сигналы [2]. Наиболее эффективным способом борьбы с активными помехами является применение в РЛС цифровых антенных решеток (ЦАР). ЦАР способны ослабить действие помех путем формирования глубоких провалов в диаграмме направленности в направлении на постановщика помех [3, 4].

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-37-90069.

© 2020 Д.Н. Зима, Д.О. Соколова, А.А. Спектор

В настоящее время обычно используется адаптивная обработка сигналов в РЛС с ЦАР. Если расположение источника помех и источника полезного сигнала различно, то применение адаптивных цифровых антенных решеток обеспечивает высокую эффективность подавления помех, которую дополнительно можно повысить путем применения других методов обработки, например, корреляционной обработки [5, 6]. При этом адаптивная обработка не эффективна при борьбе с помехами, приходящими с направлений, близких к направлению прихода полезного сигнала. Основная проблема подавления широкополосных помех заключается в зависимости положения нулей синтезируемой диаграммы как от направления прихода сигнала, так и от частоты, что приводит к невозможности сформировать адаптивной антенной решеткой достаточно глубокие нули диаграммы направленности антенны, соответствующие всем частотным точкам широкополосной помехи [8, 9].

Задача исследования состоит в определении особенностей пространственно-временного представления широкополосного сигнала и влияния на это активных помех. За счет этого можно упростить реализацию алгоритмов обработки сигналов в радиолокационных системах, повысить точность радиотехнических систем.

1. Моделирование пространственно-временных процессов на антенной решетке

Обнаружение широкополосного сигнала пространственно-распределенными элементами не всегда эффективно, поскольку только в некоторых случаях можно разделить временную и пространственную фильтрацию [9]. Поэтому возникла идея исследования сигнала, регистрируемого на антенной решетке, в качестве многомерного. Рассмотрим процесс моделирования пространственно-временного процесса на примере линейной антенной решетки (ЛАР). В этом случае сигнал будет зависеть от одной пространственной и одной временной переменных.

Допустим, ЛАР имеет N пространственно-распределенных антенных элементов. Временной сигнал и помеха в общем случае могут быть описаны общем выражением вида

$$u(t) = U(t)\cos\left(\omega_0 t + \psi(t) - \varphi\right),$$

где модулирующие процессы $U(t)$ и $\psi(t)$ определяются видом полезного сигнала; ω_0 – несущая частота; φ – начальная фаза. В общем случае имеем сигналы на выходах антенных элементов:

$$u_i = u_i(t), \quad i = \overline{1, N}.$$

Пространственный сигнал образуется в любой фиксированный момент времени t совокупностью отсчетов на всех элементах ЛАР. Фиксируя время t, имеем вектор:

$$U = \left\| u_1, u_2, ..., u_N \right\|^{\mathrm{T}}.$$

Считаем фронт волны плоским, тогда сигналы на различных элементах ЛАР отличаются временными сдвигами, зависящими от направления прихода волны θ. Углу θ соответствуют задержки между двумя соседними элементами ЛАР τ_0:

$$\tau_0 = \frac{d\sin(\theta)}{c}. \qquad (1)$$

Пространственно-временной сигнал можно представить в виде

$$u_i(t) = U\left(t-(i-1)\tau_0\right)\cos\left(\omega_0(i-1)\tau_0 + \psi\left(t-(i-1)\tau_0\right)\right),$$

а при фиксированных θ и t он становится пространственным сигналом, т. е. колебательной функцией номера антенного элемента i. Обозначим параметр $\omega_H = \omega_0\tau_0$, который определяет среднюю нормированную частоту пространственных колебаний:

$$\omega_H = 2\pi\frac{d\sin(\theta)}{\lambda}. \qquad (2)$$

Для случая эквидистантной линейной антенной решетки при $d = \lambda/2$ выражение (2) принимает вид

$$\omega_H = \pi\sin(\theta).$$

Без учета флюктуаций, вызванных модуляциями, пространственный сигнал соответствует:

$$u_i = \cos\left(\omega_H(i-1)\right) = \cos\left(\pi\sin(\theta_\Pi)(i-1)\right). \qquad (3)$$

Из (3) нетрудно заметить, что при изменении угла θ изменяется пространственная частота колебаний помехи. При $\theta = \pm 90^\circ$ частота максимальна. Пространственные сигналы при направлении прихода помех $\theta = 90^\circ$ и $\theta = -90^\circ$ отличаются фазой. При угле $\theta = \pm 90^\circ$ частота пространственных колебаний максимальна и равна $1/\lambda$, пространственный период равен длине волны λ. Очевидно, размещение элементов на расстоянии $d = \lambda/2$ соответствует при $\theta = \pm 90^\circ$ взятию двух отсчетов на интервале одного периода, что, по теореме Котельникова, соответствует минимальной допустимой частоте дискретизации для восстановления непрерывной функции. Таким образом, в каждый момент времени на ЛАР имеется гармонический пространственный сигнал, что справедливо при переходе от дискретной пространственной переменной к непрерывной. Тогда при последовательном попадании на линейку пространственно-распределенных элементов различных участков широкополосного сигнала в дискретном спектре пространственного сигнала видно только одну частоту, независимо от наличия модуляции. Данное свойство удобно при наличии нескольких сигналов помехи с разными направлениями прихода. Данный характер сохраняется при рассмотрении пространственно-временного колебания.

При замене пространственной дискретной переменной i на непрерывную координату $x = d(i-1)$ можно представить (3) в виде

$$u(t,\,x) = U\left(t-\frac{x}{d}\tau_0\right)\cos\left[\omega_0\left(t-\frac{x}{d}\tau_0\right)+\psi\left(t-\frac{x}{d}\tau_0\right)\right]. \qquad (4)$$

Очевидно, что двумерный сигнал $u(t,x)$ обладает свойством

$$u(t,\ x) = u(t - k_t x), \tag{5}$$

где $k_t = \sin\theta / c$ – коэффициент преобразования временной и пространственной координат. Тогда, используя (4) и (5), с помощью двумерного преобразования Фурье спектр пространственно-временного сигнала можно представить в виде

$$\overset{\bullet}{U}(\omega_t,\ \omega_x) = \int_{-\infty}^{+} \int_{-x_m/2}^{x_m/2} u(t - k_t x) e^{-j\omega_t t} e^{-j\omega_x x} dt dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{+} u(t_1) e^{-j\omega_t t_1} dt_1 \int_{-x_m/2}^{x_m/2} e^{-j(\omega_t k_t + \omega_x)x} dx =$$

$$= \overset{\bullet}{U}(\omega_t) x_m \frac{\sin\left[(\omega_t k_t + \omega_x) x_m / 2\right]}{(\omega_t k_t + \omega_x) x_m / 2},$$

где ω_t и ω_x – частоты, соответствующие временной и пространственной переменным и называемые временная и пространственная частоты. Качественный вид двумерного спектра пространственно-временного сигнала с линейной частотной модуляцией показан на рис. 1. Для различных углов прихода колебания положение активной области спектра различно, что приведено на контурных графиках амплитудного спектра пространственно-временного сигнала на рис. 2.

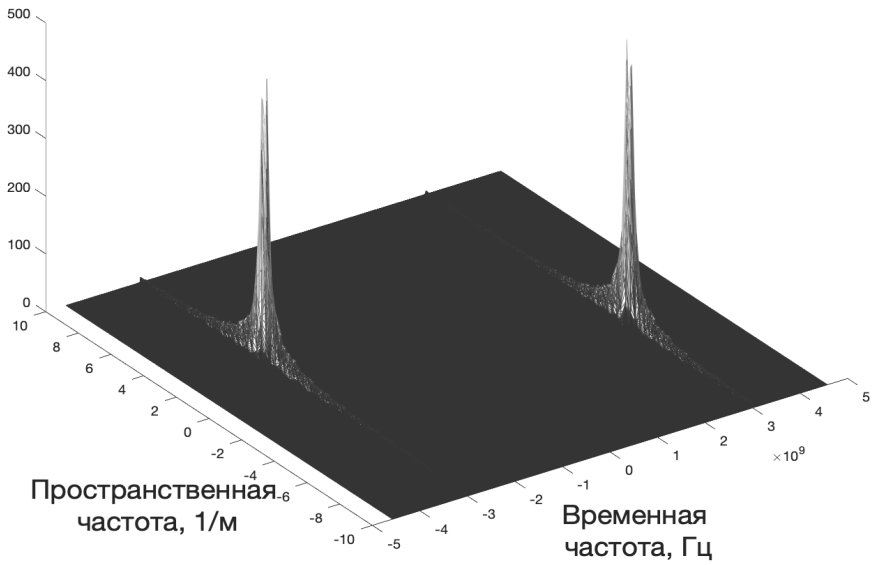


Рис. 1 – Спектр пространственно-временного сигнала с линейной антенной решетки

Fig. 1 – Spectrum of spatiotemporal signal from linear antenna array

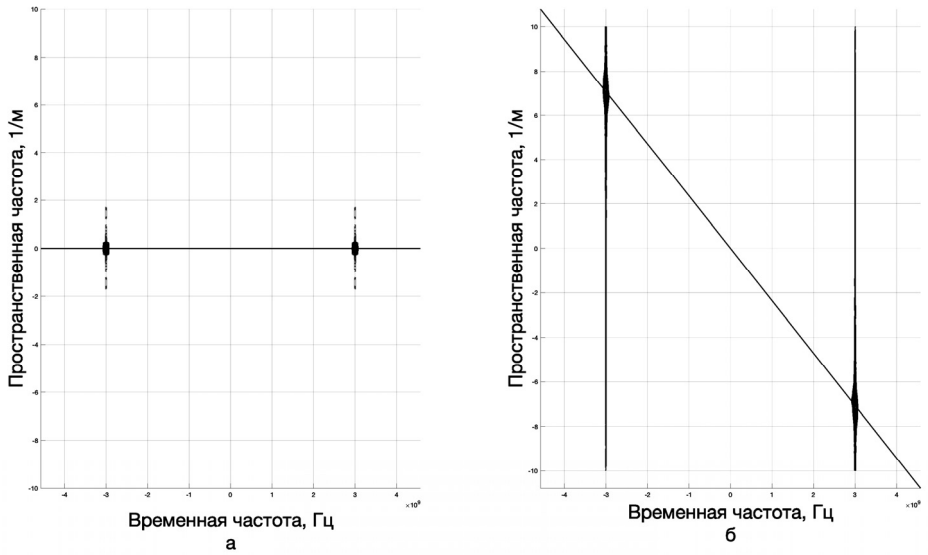


Рис. 2 – Контурный график спектра пространственно-временного сигнала при угле прихода колебания:

а – θ = 0°; *б* – θ = 45°

Fig. 2 – Contour plot of the spectrum of spatiotemporal signal at the angle of arrival of the oscillation:

a – θ = 0°; *b* – θ = 45°

2. Понятия узкополосного и широкополосного сигнала в пространственном смысле

Широкополосными, или сложными, в радиотехнике принято называть сигналы, у которых произведение эффективной ширины спектра на длительность много больше единицы. Большинство используемых сигналов в радиолокации узкополосные, но интерес к широкополосным и сверхширокополосным сигналам нарастает. В РЛС с цифровыми антенными решетками, использующих широкополосные сигналы, недостаточным оказывается деление сигналов на широкополосные и узкополосные, и происходит дальнейшая классификация на широкополосные и узкополосные сигналы в пространственном смысле [9]. Сигнал считается узкополосным в пространственном смысле, если значения его модулирующих функций в любой момент времени на крайних элементах антенной решетки при любом направлении прихода волны практически одинаковы. В иных случаях сигнал рассматривают как широкополосный в пространственном смысле.

Использование широкополосных сигналов в пространственном смысле приводит к изменению процессов, связанных с формированием сигналов и их обработкой. Задача обнаружения широкополосного в пространственно-временном смысле сигнала пространственно-распределенными элементами представляется трудоемкой, поскольку только в некоторых случаях можно разделить временную и пространственную фильтрацию [9]. Только если сигнал относится к числу узкополосных в пространственном смысле, то при его формировании, управлении характеристиками направленности ЦАР, построении алгоритмов обработки возможно разделение операций временных и пространственных преобразований. Для случая широкополосных сигналов в пространственном смысле необходимо разработать эффективный подход к обработке таких сигналов.

3. Байесовская пространственно-временная обработка во временной области

Рассмотрим применение оптимального байесовского критерия обнаружения сигнала для случая обработки пространственно-временного сигнала в областях временной и пространственной переменных. При фиксированном времени t имеем вектор

$$U = \|u_1, u_2, ..., u_N\|^{\mathrm{T}},$$

где $u_i = u_i(t)$, $U = U(t)$.

Вектор U из-за наличия помех является случайным с гауссовским распределением, а совместная плотность распределения вероятностей при отсутствии и наличии сигнала имеет вид соответственно:

$$w_0(U) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^I \left(\det|R|\right)^{I/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}U^{\mathrm{T}} R^{-1} U\right\},$$

$$w_1(U) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^I \left(\det|R|\right)^{I/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(U-S)^{\mathrm{T}} R^{-1} (U-S)\right\}.$$

Обнаружитель работает по методу максимального правдоподобия:

$$l(U) = \frac{w_1(U)}{w_0(U)} = \exp\left\{-\frac{1}{2}(U-S)^{\mathrm{T}} R^{-1}(U-S) + \frac{1}{2}U^{\mathrm{T}} R^{-1} U\right\} =$$

$$= \exp\left\{\frac{1}{2}\left[S^{\mathrm{T}} R^{-1} U + U^{\mathrm{T}} R^{-1} S - S^T R^{-1} S\right]\right\}.$$

Решающая статистика является корреляционной статистикой и имеет вид

$$Z(U) = U^{\mathrm{T}} R^{-1} S .$$

Таким образом, для применения такой обработки необходимо находить обратную корреляционную матрицу R пространственно-распределенной помехи вида

$$u_{\Pi i}(t) = \sum_{j=1}^{J} \xi_{ji}(t) + u_{\text{Ш}i}(t) .$$

Общий вид корреляционной матрицы:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{I1} & r_{I2} & \dots & r_{II} \end{pmatrix},$$

а ее элементы:

$$r_{i_1 i_2} = \overline{u_{\Pi i_1}(t) u_{\Pi i_1}(t)} = \sum_{j=1}^{J} D_{\Pi j} r^{\langle j \rangle}\left(\tau_{i_1 i_2}{}^{\langle j \rangle}\right) + \sigma^2 \delta(i_1, i_2) ,$$

где $D_{\Pi j}$ – дисперсия j-й помехи на элементах антенны; $\tau_{i_1 i_2}{}^{\langle j \rangle}$ – временной сдвиг j-й помехи в i_1-м и i_2-м элементах ЦАР:

$$\tau_{i_1 i_2}^{\langle j \rangle} = f\left(\overrightarrow{\theta_{\text{С}}}, \overrightarrow{\theta_{\Pi}}^{\langle j \rangle}\right),$$

$\overrightarrow{\theta_{\text{С}}}, \overrightarrow{\theta_{\Pi}}^{\langle j \rangle}$ – векторы групповых направлений на цель и j-ю помеху; $r^{\langle j \rangle}(\tau)$ – нормированная АКФ j-й помехи:

$$r^{\langle j \rangle}(\tau) = \frac{\sin(\pi \cdot \Delta f_{\text{д}} \tau)}{\pi \cdot \Delta f_{\text{д}} \tau},$$

$$\Delta d_{i_1 i_2}(\theta_{\Pi}) = (i_2 - i_1)\, d \sin(\theta_{\Pi}).$$

Временная задержка между элементами i_2 и i_1, согласно выражению (1):

$$\tau_{i_1 i_2} = \frac{\Delta d_{i_1 i_2}(\theta_{\Pi})}{c} = \frac{(i_2 - i_1)\, d \sin(\theta_{\Pi})}{c}.$$

Применение оптимального байесовского критерия обнаружения сигнала требует обращения корреляционных матриц помехи порядка, соответствующего квадрату произведения числа приемных пространственно-распределенных элементов k_N и числа моментов времени k_T. Это требует трудоемких расчетов, приводит к появлению ошибок, а при малых углах прихода помехи корреляционная матрица близка к вырожденной матрице.

4. Пространственно-временная обработка на основе модели линейного предсказания

Проблемы, возникающие при байесовской обработке пространственно-временных сигналов во временной области, можно решить, если использовать модель марковского случайного процесса для описания помехи на пространственно-распределенных антенных элементах.

Обработка строится на модели авторегрессии, т. е. линейного предсказания [10], минимального порядка:

$$u_i = \sum_{l=1}^{L} a_l u_{i-l} + \nu_i. \tag{6}$$

Для квазигармонических процессов это второй порядок. Поэтому при фиксированном t и при единственном источнике помех с углом θ_{Π} используется модель

$$u_i = a_1 u_{i-1} + a_2 u_{i-2} + \nu_i,$$

где ν_i – независимый гауссовский шум предсказания. Для определения этих коэффициентов предсказания используется метод моментов, который основан на использовании соотношений, связывающих искомые параметры с моментами наблюдаемых процессов [11].

В качестве показателя соответствия помехи марковской модели (рис. 3) приведена временная реализация помехи до и после применения обработки. Из рисунка видно, что частота пересечения сигналом нулевого уровня увеличилась, что может служить признаком уменьшения корреляции между соседними отсчетами. На рис. 4 видно, что АКФ результирующего информационного шума стремится к дельтаобразному виду.

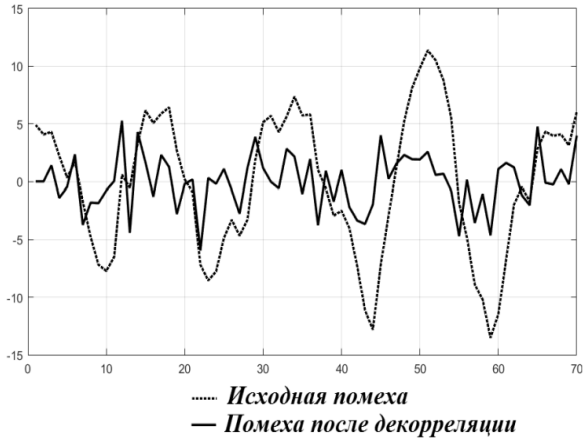


Рис. 3 – Временная реализация помехи до и после проведения процедуры декорреляции

Fig. 3 – Time realization of the interference before and after the decorrelation procedure

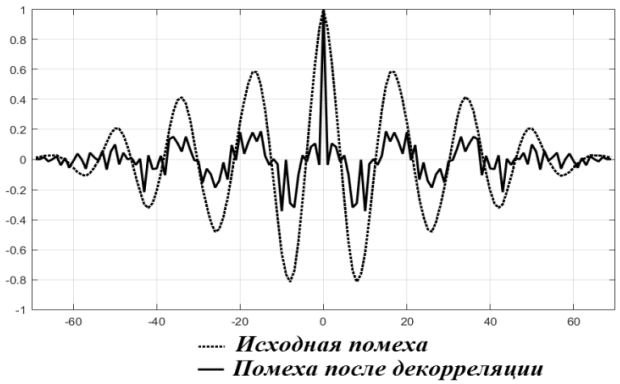


Рис. 4 – АКФ помехового сигнала до и после проведения декорреляции

Fig. 4 – ACF of the interference signal before and after decorrelation

Если сигнал принимается с известного направления на фоне белого шума, то его обработка может быть всегда разделена на пространственную и временную [9, 12]. Тогда в данном случае совместное распределение отсчетов помехи на всех элементах линейной антенной решетки для модели с двумя коэффициентами предсказания на всех I элементах решетки:

$$w_0(U) = w_0(u_1, u_2, ..., u_I) = w_0(u_1, u_2)\prod_{i=3}^{N}\pi\left(u_i \middle| u_{i-1},\ u_{i-2}\right),$$

где $w_0(u_1, u_2) = \dfrac{1}{2\sigma_u{}^2\sqrt{1-r_{12}^2}}\exp\left[-\dfrac{u_1^2 - 2r_{12}u_1u_2 + u_2^2}{2\sigma_u^2\left(1-r_{12}^2\right)}\right]$; $\pi\left(u_i \middle| u_{i-1}, u_{i-2}\right) = \dfrac{w_0(U_{3i})}{w_0(U_{2i})}$ – плотность вероятности перехода, при этом:

$$w_0(U_{3i}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sqrt{|R_3|}} \exp\left[-\frac{1}{2} U_{3i}^T R_3^{-1} U_{3i}\right]; \tag{7}$$

$$w_0(U_{2i}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|R_2|}} \exp\left[-\frac{1}{2} U_{2i}{}^T R_2^{-1} U_{2i}\right]. \tag{8}$$

Укороченные векторы сигнала помехи в выражениях (7) и (8) имеют вид:

$$U_{2i} = \|u_i,\, u_{i-1}\|^{\mathrm{T}},$$

$$U_{3i} = \|u_i,\, u_{i-1}, u_{i-2}\|^{\mathrm{T}},$$

а корреляционные матрицы укороченных векторов:

$$R_2 = \begin{Vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{Vmatrix}, \qquad R_3 = \begin{Vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{Vmatrix}.$$

С учетом введенных обозначений, совместное распределение отсчетов помехи на всех N элементах решетки:

$$w_0(U) = w_0(U_{22}) \prod_{i=3}^{N} \frac{w_0(U_{3i})}{w_0(U_{2i})}.$$

Рассмотрим гипотезу наличия полезного сигнала:

$$w_1(U) = w_0(U - S),$$

где S – вектор сигнала на решетке в момент времени t. Тогда, отношение правдоподобия:

$$l(U) = \frac{w_1(U)}{w_0(U)} = \frac{w_0(U_{22} - S_{22})}{w_0(U_{22})} \prod_{i=3}^{N} \frac{w_0(U_{3i} - S_{3i})}{w_0(U_{3i})} \frac{w_0(U_{2i})}{w_0(U_{2i} - S_{2i})}. \tag{9}$$

В (8) сигнальные укороченные вектора имеют вид:

$$S_{2i} = \|s_i,\ s_{i-1}\|^{\mathrm{T}},$$

$$S_{3i} = \|s_i,\, s_{i-1},\, s_{i-2}\|^{\mathrm{T}}.$$

С учетом введенные обозначений рассмотрим в (9) раздельно дроби:

$$l_{3i} = \frac{w_0(U_{3i} - S_{3i})}{w_0(U_{3i})} =$$

$$= \exp\left[U_{3i}^{\mathrm{T}} R_3^{-1} S_{3i} - \frac{1}{2} S_{3i}^{\mathrm{T}} R_3^{-1} S_{3i}\right],$$

$$l_{2i} = \frac{w_0(U_{2i} - S_{2i})}{w_0(U_{2i})} = \exp\left[U_{2i}^{\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{2i} - \frac{1}{2} S_{2i}^{\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{2i}\right],$$

$$l(U) = l_{22}\prod_{i=3}^{N}\frac{l_{3i}}{l_{2i}} = \exp\left[U_{22}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{22} - \frac{1}{2}S_{22}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{22}\right]\times$$

$$\times\exp\left\{\sum_{i=3}^{N}\left[U_{3i}^{\mathrm{T}}R_3^{-1}S_{3i} - U_{2i}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{2i} -\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{1}{2}\left(S_{3i}^{\mathrm{T}}R_3^{-1}S_{3i} - S_{2i}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{2i}\right)\right]\right\}.$$

Решающая статистика $\ln(l(U)) = L(U)$:

$$L(U) = U_{22}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{22} - \frac{1}{2}S_{22}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{22} +$$

$$+\sum_{i=3}^{N}\left[U_{3i}^{\mathrm{T}}R_3^{-1}S_{3i} - U_{2i}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{2i} - \frac{1}{2}\left(S_{3i}^{\mathrm{T}}R_3^{-1}S_{3i} - S_{2i}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{2i}\right)\right]. \qquad (10)$$

В (10) присутствуют слагаемые одинаковые при обеих гипотезах и неинформативные, таким образом они могут быть отнесены к порогу принятия решения, поэтому решающая статистика имеет вид:

$$Z(U) = U_{22}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{22} + \sum_{i=3}^{N}\left[U_{3i}^{\mathrm{T}}R_3^{-1}S_{3i} - U_{2i}^{\mathrm{T}}R_2^{-1}S_{2i}\right]. \qquad (11)$$

Перейти от пространственной к пространственно-временной обработке сигналов линейной антенной решетки можно путем введения понятия кадра. Кадр – совокупность отсчетов в данный момент времени t. Предполагаем отдельные кадры независимыми.

Имеем вектор $U^{(t)} = \left\|u_1^{(t)}, u_2^{(t)}, ..., u_I^{(t)}\right\|^{\mathrm{T}}$. В данном случае рассматривается дискретное время $t = \overline{1, I}$, являющееся номером кадра. Решающая статистика строится на основе отношения правдоподобия:

$$l(U) = \frac{w_1(U)}{w_0(U)}, \qquad (12)$$

где

$$U = \left\|U^{(1)\mathrm{T}},\ U^{(2)\mathrm{T}}, ..., U^{(N)\mathrm{T}}\right\|^{\mathrm{T}}. \qquad (13)$$

В предположении о независимости векторов (12), из (13) имеем

$$l(U) = \prod_{t=1}^{I} l^{(t)}(U^{(t)}),$$

где $l^{(t)}(U^{(t)})$ определяется формулой, в которой все входящие векторы приобретают верхний индекс t:

$$l(U) = \exp\left[U_{22}^{(t)\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{22}^{(t)} - \frac{1}{2} S_{22}^{(t)\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{22}^{(t)} \right] \times$$

$$\times \exp\left\{ \sum_{i=3}^{N} \left[U_{3i}^{(t)\mathrm{T}} R_3^{-1} S_{3i}^{(t)} - U_{2i}^{(t)\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{2i}^{(t)} - \right.\right.$$

$$\left.\left. -\frac{1}{2}\left(S_{3i}^{(t)\mathrm{T}} R_3^{-1} S_{3i}^{(t)} - S_{2i}^{(t)\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{2i}^{(t)} \right) \right] \right\}.$$

Решающая статистика для I кадров имеет корреляционный вид в соответствии с (11):

$$Z(U) = \sum_{t=1}^{I} Z^{(t)}(U^{(t)}) =$$

$$= \sum_{t=1}^{I} \left\{ U_{22}^{(t)\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{22}^{(t)} + \sum_{i=3}^{N} \left[U_{3i}^{(t)\mathrm{T}} R_3^{-1} S_{3i}^{(t)} - U_{2i}^{(t)\mathrm{T}} R_2^{-1} S_{2i}^{(t)} \right] \right\}.$$

Таким образом, происходит временное накопление вышеописанной пространственной обработки. Следует отметить, что обработка сигнала при наличии нескольких помех требует большего количества коэффициентов предсказания в (6).

5. Исследование алгоритма пространственно-временной обработки

В работе предлагается подход к обработке, основанный на представлении сигналов и помех, поступающих на элементы ЦАР, как функций временной и пространственных координат. Это обусловлено пространственным распределением приемных антенных элементов антенной решетки и пространственного распределения помех. В качестве полезного сигнала используется широкополосный импульсный сигнал с линейной частотной модуляцией, а в качестве помех рассматриваются активные шумовые помехи, прошедшие входные устройства, которые осуществляют частотную селекцию и формируют спектр помехового колебания.

Оценим выигрыш отношения сигнал/помеха, получаемый при обработке для фиксированного момента времени, т.е. пространственно-временной сигнал трансформирован в пространственный.

Отношение сигнал/помеха на входе пространственного фильтра:

$$q_{\text{вых}}^2 = \frac{S^2}{\sigma_u^2},$$

где S – амплитуда входного сигнала; σ_u^2 – дисперсия помехи на каждом элементе антенны.

Для байесовской обработки пространственно-временного сигнала во временной отношение сигнал/помеха принимает вид

$$q_{\text{вых}}^2 = \frac{P_{\text{С вых}}}{P_{\text{П вых}}} = s(\mathbf{1}^{\mathrm{T}} R^{-1} S),$$

где $S = \|s, s, ..., s\|^{\mathrm{T}} = s\|1, 1, ..., 1\|^{\mathrm{T}}$ – вектор полезного сигнала, $\mathbf{1} = \|1, 1, ..., 1\|^{\mathrm{T}}$ – вектор единичных элементов, R – корреляционная матрица пространственно-распределенной помехи.

Определим отношение сигнал/помеха на выходе пространственного фильтра для модели с линейным предсказанием (марковская модель второго порядка):

$$\overline{Z(U)} = 0,$$

$$\overline{Z(U)^2} = P_{\Pi\,\text{вых}} = \overline{Z(U)Z(U)^{\mathrm{T}}}.$$

С учетом описанного в предыдущем разделе и на основе выражения (11) находятся $Z(U)$ и отдельные компоненты $\overline{Z(U)^2}$.

При теоретическом исследовании критерием качества предложенного метода являлось улучшение отношения сигнал/помеха после пространственной обработки к входному отношению сигнал/помеха. На рис. 5 отображено улучшение отношения сигнал/помеха для байесовской обработки пространственного сигнала и для обработки на основе модели линейного предсказания в зависимости от направления прихода одного помехового колебания и при фиксированном направлении на полезный сигнал $(\theta_c = 0^\circ)$.

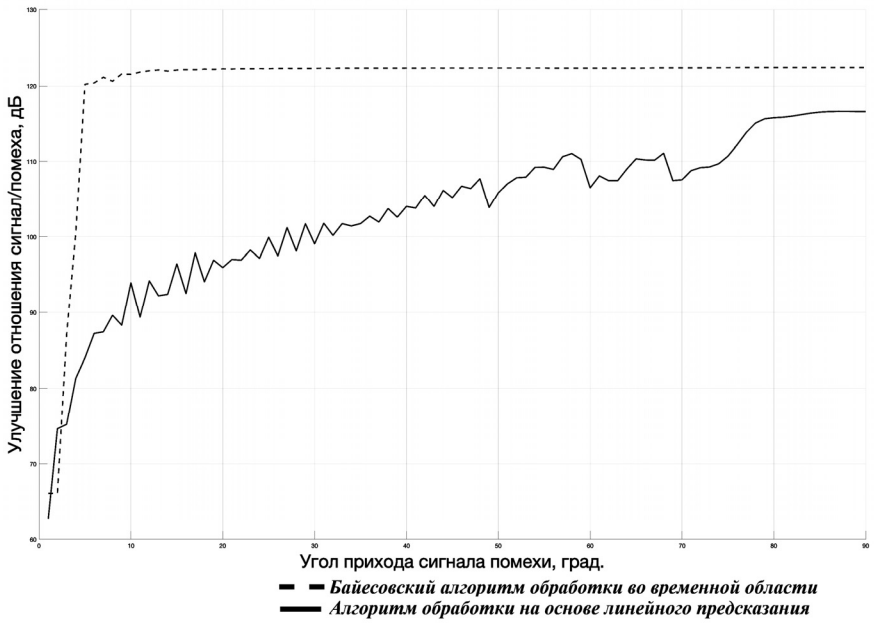


Рис. 5. – Зависимость улучшения отношения сигнал/помеха от направления прихода помехи

Fig. 5 – Dependence of the improvement in the signal-to-noise ratio on the direction of arrival of the interference

Из рис. 5 видно, что алгоритмы обработки пространственных сигналов на основе модели линейного предсказания позволяют избежать недостатков, присущих оптимальному байесовскому алгоритму обработки во временной области без

ухудшения выигрыша по отношению сигнал/помеха. При переходе к пространственно-временной обработке на основе марковской модели улучшение отношения сигнал/помеха приближается к значениям, полученным при оптимальной байесовской обработке. Дальнейшее исследование показало, что при увеличении количества коэффициентов предсказания и объема выборки помехи качество обработки увеличивается, но это приводит к значительным вычислительным затратам.

Заключение

В работе предложен и развит подход к синтезу алгоритма обработки сигналов, регистрируемых антенной решеткой, направленные на повышение их быстродействия. На основе теории многомерной обработки сигналов предложен подход к моделированию сигналов и помех, поступающих на элементы антенной решетки, как многомерных пространственно-временных процессов. Для различных углов прихода колебания положение активной области спектра различно, что может стать основой для разделения сигналов и в том числе – для борьбы с помехами. Использование байесовской обработки пространственно-временных сигналов во временной области является оптимальной, но требует трудоемких расчетов, приводит к появлению ошибок, а при малых углах прихода помехи корреляционная матрица близка к вырожденной матрице, что решается путем использования модели марковского случайного процесса для описания помехи на пространственно-распределенных антенных элементах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Садомовский А.С**. Использование широкополосных сигналов в системах радиосвязи // Радиоэлектронная техника. – Ульяновск, 2011. – № 1 (4). – С. 161–165.
2. **Lukin K.A**. Radar design using Noise/Randome waveforms // 2006 International Radar Symposium, IRS-2006. – Krakow, 2006. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/IRS.2006.4338071.
3. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
4. **Нечаев Ю.Б., Борисов Д.Н., Пешков И.В.** Автокалибровочный алгоритм компенсации амлитудно-фазовых ошибок в каналах цифровой антенной решетки // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2011. – № 1. – С. 59–69.
5. Адаптивные антенные решетки. В 2 ч. Ч. 1 / В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин и др.; под общ. ред. В.А. Григорьева. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 179 с.
6. Адаптивные антенные решетки. В 2 ч. Ч. 2. / В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин и др.; под общ. ред. В.А. Григорьева. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 118 с.
7. **Ратынский М.В**. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
8. Principles of modern radar. Vol. 3. Radar applications / ed. by W.L. Melvin, J.A. Scheer. – Edison: SciTech Publishing, 2014. – 820 p.
9. Обработка сигналов в радиотехнических системах / под ред. А.П. Лукошкина. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 400 с.
10. **Казаков В.А**. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. – М.: Советское радио, 1973. – 232 с.
11. **Соколова Д.О**. Непараметрическое обнаружение и классификация в сейсмических системах охраны: дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск, 2013. – 147 с.
12. **Якубов В.П.** Статистическая радиофизика. – Томск: НТЛ, 2006. – 132 с.

SPATIOTEMPORAL PROCESSING OF BROADBAND SIGNALS BASED ON THE LINEAR PREDICTION MODEL

Zima D.N., Sokolova D.O., Spector A.A.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The main developments in the field of radar surveillance systems are aimed at studying their functioning, taking into account the influence of various factors, such as the effect of interference. The most important thing seems to be the detection of a broadband signal, which makes it possible to increase the range and speed resolution. This raises the problem of suppressing broadband interference with existing methods. The paper develops methods for processing broadband signals in the presence of active interference as applied to the use in systems with various variants of spatio-temporal antenna elements, in particular on the example of linear antenna arrays. The approach is based on the representation of signals and interference recorded by a digital antenna array in the form of multidimensional spatiotemporal processes, i.e. functions of spatial and temporal coordinates. This is due to both the spatial distribution of the antenna array elements and the spatial distribution of interference. Bayesian signal detector is the optimal algorithm and has the best characteristics, but at the same time its practical implementation is extremely difficult, carried out in the field of spatiotemporal coordinates. The investigated processing algorithms are based on the linear prediction model, i.e. by using the model of a Markov random process to describe interference on spatially distributed antenna elements. Particular attention is paid to the development of algorithms that can be implemented with limited computing resources and work in real time, which is a problem of statistical methods of signal processing.

Keywords: spatiotemporal signal, broadband signal, active interference, Markov random process, Bayesian processing, radar systems, digital antenna array.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-17-31

REFERENCES

1. Sadomovskii A.S. Ispol'zovanie shirokopolosnykh signalov v sistemakh radiosvyazi [The use of broadband signals in radio communication systems]. *Radioelektronnaya tekhnika* [Radioelectronic equipment]. Ul'yanovsk, 2011, no. 1 (4), pp. 161–165.
2. Lukin K.A. Radar design using Noise/Randome waveforms. *2006 International Radar Symposium, IRS-2006*, Krakow, 2006, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IRS.2006.4338071.
3. Voskresenskii D.I., Kanashchenkov A.I., eds. *Aktivnye fazirovannye antennye reshetki* [Active phased antenna arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 488 p.
4. Nechaev Yu.B., Borisov D.N., Peshkov I.V. Avtokalibrovochnyi algoritm kompensatsii amlitudno-fazovykh oshibok v kanalakh tsifrovoi antennoi reshetki [Autocalibration algorithm of compensation of gain and phase imperfections in channels of smart antenna]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika = Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2011, no. 1, pp. 59–69.
5. Grigor'ev V.A., ed. *Adaptivnye antennye reshetki*. V 2 ch. Ch. 1 [Adaptive antenna arrays. In 2 pt. Pt. 1]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2016. 179 p.
6. Grigor'ev V.A., ed. *Adaptivnye antennye reshetki*. V 2 ch. Ch. 2 [Adaptive antenna arrays. In 2 pt. Pt. 2]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2016. 118 p.
7. Ratynskii M.V. *Adaptatsiya i sverkhrazreshenie v antennykh reshetkakh* [Adaptation and superresolution in antenna arrays]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2003. 200 p.
8. Melvin W.L., Scheer J.A., eds. *Principles of modern radar*. Vol. 3. *Radar applications*. Edison, SciTech Publishing, 2014. 820 p.
9. Lukoshkin A.P., ed. *Obrabotka signalov v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Signal processing in radio-technical systems]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1987.400 p.
10. Kazakov V.A. *Vvedenie v teoriyu markovskikh protsessov i nekotorye radiotekhnicheskie zadachi* [Introduction to the theory of Markov processes and some radio engineering problems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 232 p.

11. Sokolova D.O. *Neparametricheskoe obnaruzhenie i klassifikatsiya v seismicheskikh sistemakh okhrany*. Diss. kand. tekhn. nauk [Nonparametric detection and classification in seismic security systems. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 147 p.
12. Yakubov V.P. *Statisticheskaya radiofizika* [Statistical radiophysics]. Tomsk, NTL Publ., 2006. 132 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зима Дарья Николаевна – родилась в 1994 году, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов. Опубликовано 12 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: d.zima@corp.nstu.ru).

Zima Daria Nikolaevna (b. 1994) – a postgraduate student at the department of radio engineering fundamentals in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on statistical signal processing. She is the author of 12 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.zima@corp.nstu.ru).

Соколова Дарья Олеговна – родилась в 1984 году, канд. техн. наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: d.sokolova@corp.nstu.ru).

Sokolova Darya Olegovna (b. 1984) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the departmentof radio engineering in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on statistical signal processing. She is the author of 35 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.sokolova@corp.nstu.ru).

Спектор Александр Аншелевич – родился в 1946 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: локационные, навигационные и инфокоммуникационные технологии, цифровые статистические методы обработки сигналов и изображений. Опубликовано около 200 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: spectoraa@mail.ru).

Spector Alexander Anshelevich (b. 1946) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of radio engineering fundamentals in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on location, navigation, and information communication technologies, digital statistical methods of signal and image processing. He is the author of about 200 scientific papers (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: spectoraa@mail.ru).

Статья поступила 21 ноября 2020 г.
Received November 21, 2020

To Reference:

Zima D.N., Sokolova D.O., Spector A.A. Prostranstvenno-vremennaya obrabotka shirokopolosnykh signalov na osnove modeli lineinogo predskazaniya [Spatiotemporal processing of broadband signals based on the linear prediction model]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 17–31. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-17-31.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2020 октябрь–декабрь № 4 (49)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 622.831

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО УДАРА НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Н.В. Липатов
Тюменский государственный университет
ООО «Корэтест сервис»

В исследовании различные горные породы были нагреты для повышения значений до температуры 250 °C, для определения значений потери прочности и изменения физических свойств, при термических циклах. В результате термических напряжений возникают микротрещины или видимые макротрещины, которые приводят к заметным потерям прочности в зависимости от различных факторов, таких как температура, продолжительность нагрева, детали охлаждения и некоторые свойства породы, такие как минералогический состав, размер зерна, пористость, микротрещины перед нагревом, процесс [2, 5]. Причина потери прочности при нагревании и охлаждении, вариации деформации различных минералов вызывают растрескивание в контактах минералов и распространение существующих трещин.

Эта ситуация вызывает физическое выветривание горных материалов. Кроме того, следует отметить химическое выветривание при высоких температурах как одну из основных причин потери прочности из-за тепловых изменений. При физическом выветривании минералогический состав горных пород и уровень температуры являются определяющими параметрами для химического выветривания. Поскольку температуры в этом исследовании, как правило, не являются критическими для начала химического выветривания, в исследовании основное внимание уделялось физическому выветриванию, а не химическому.

Ключевые слова: тепловой удар, прочностные свойства, горные породы, термическая прочность, усталостная прочность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-32-40

Введение

Температура – хорошо известный фактор, который существенно меняет прочностные свойства и деформируемость горных пород. Значения прочности на сжатие и растяжение уменьшаются с повышением температуры. Породы значительно расширяются и размягчаются при сильном нагреве, что также является причиной потери прочности и уменьшения значений модуля упругости.

Поскольку породы состоят из минералов с разным тепловым расширением, растяжение и сжатие породы различается. Изменение температуры вызывает напряжение между минеральными зернами, что приводит к образованию микротрещин. В зависимости от температуры нагрева охлажденные горные породы могут сохранять свои значения прочности. Также горные породы пластически деформируются с образованием микротрещин после охлаждения в результате высоких уровней термической деформации.

Количество термических циклов является важным параметром для пластической деформации после охлаждения и потери прочности из-за термических напряжений [4, 6]. Для многих горных пород уровни термической деформации могут быть намного выше, чем уровни механической деформации до нагрева,

© 2020 Н.В. Липатов

и заметное разупрочнение, которое приводит к значительному изменению свойств деформируемости, наблюдается при различных температурах, например, выше 250 °С. При увеличении скорости охлаждения вероятность появления крупных трещин увеличивается по сравнению со случаем медленного охлаждения. Значения температуры и теплоемкости охлаждающей среды изменяют скорость охлаждения и охлаждающее влияние на образование трещин [3].

Основной целью данной работы является проведение экспериментальных исследований горных пород на пористость, деформацию и прочностные свойства после теплового удара.

Задачи, необходимые для реализации этой цели:

1) значения деформации с увеличением числа тепловых циклов при одном и том же изменении температуры;

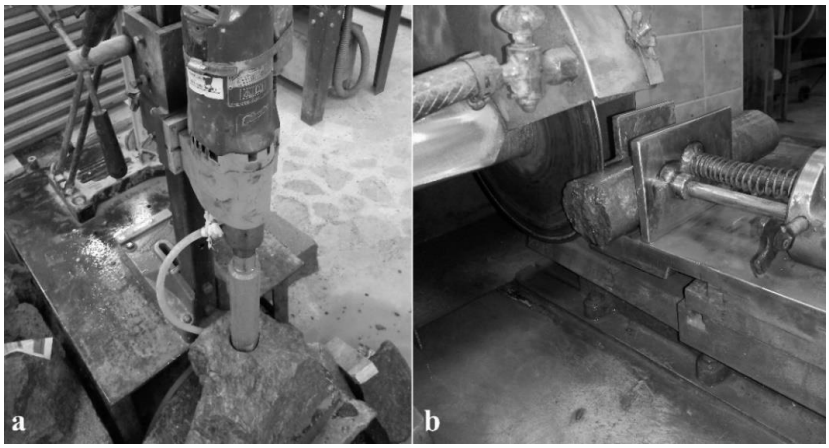
2) изменение теплоемкости испытуемых образцов при охлаждении водой и воздухом;

3) изменение значений прочности на одноосное сжатие при различных условиях охлаждения.

1. Материалы и методы

В исследовании было испытано шестьдесят образцов керна, такие как известняк, песчаник, кальцит, карбонат и доломит. Различные горные породы были использованы в испытаниях для определения термических деформаций при различных температурах, способности обращать термическую деформацию, времени охлаждения, изменений значений пористости и потери прочности. Согласно предложениям Международного общества механиков горных пород и инженеров горных пород (ISRM), использовались корончатые фрезы диаметром 54,7 мм, и все образцы керна горных пород были выбурены с одинаковым отношением длины к диаметру (с помощью пильных станков (рис. 1)). Торцы кернов горных пород были сглажены и сделаны перпендикулярно оси образца с точностью 0,05 мм.

Скорость нагрузки была равной 0,5 МПа/с, а гидравлический пресс с максимальной грузоподъемностью 300 кН был использован в испытании на одноосное сжатие UCS (рис. 2).



а *б*

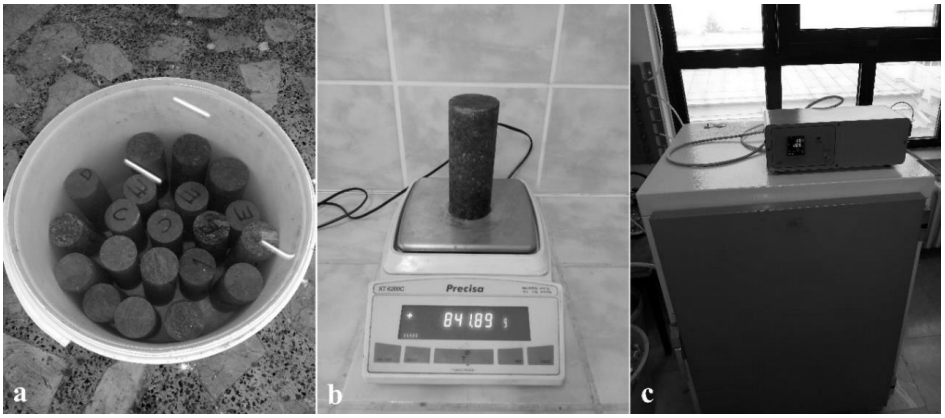
Рис. 1 – Бурение горных пород (*а*); резка керна с помощью пилы (*б*)

Fig. 1 – Drilling rocks (*a*); cutting the core with a saw (*b*)

Рис. 2 – Испытание на одноосное сжатие UCS

Fig. 2 – UCS uniaxial compression test

Для определения кажущейся пористости образцы керна погружали в воду на сутки для насыщения [1]. После того как образцы были извлечены из емкости с водой, их поверхности сушили, осторожно протирая тканью. Образцы были взвешены с помощью цифровых весов с чувствительностью 0,01 г. После определения веса насыщенных пород образцы керна помещали в печь с температурой 105 °С, где была произведена сушка в течение 24 часов, затем определяли сухую массу для оценки веса испарившейся воды и объема пустот. Для точного расчета объемов образцов, длина и диаметр каждого из образцов керна горных пород были измерены отдельно с помощью цифрового штангенциркуля. Следуя методу, предложенному ISRM, пористость образцов керна горных пород тщательно определялась до и после циклов нагрева. Испытательная среда и оборудование, используемые для испытаний на пористость, показаны на рис. 3.



а *б* *в*

Рис. 3 – Испытание на пористость:

а – насыщение образцов водой; *б* – взвешивание; *в* – печь

Fig. 3 – Porosity test:

a – saturation of samples with water; *b* – weighing; *c* – oven

Процедура изменения температуры для циклов нагрева приведена в табл. 1. В исследовании были рассмотрены два различных процесса охлаждения: охлаждение в атмосферных условиях и охлаждение в воде для сравнения различных охлаждающих сред.

Процедура изменения температуры была одинаковой для образцов, охлажденных как на воздухе, так и в воде, которые после охлаждения нагревали в печи.

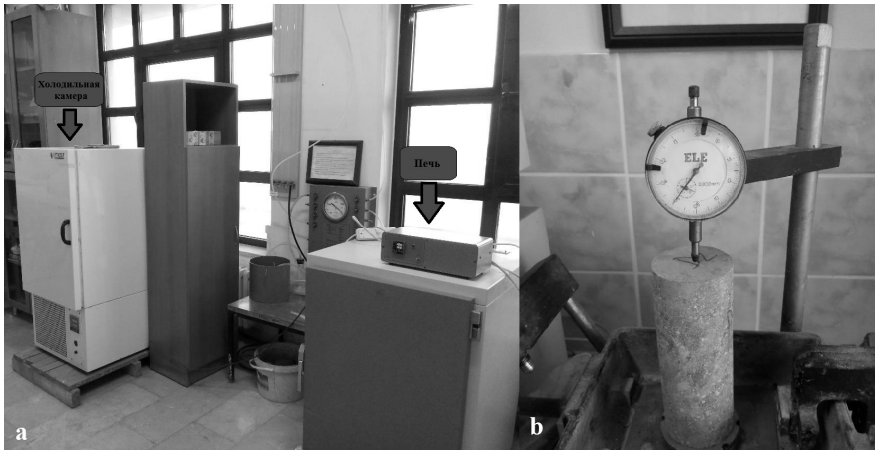
Таблица 1/Table 1

Процедура термического изменения
Thermal change procedure

Номер цикла	Температура перед нагревом, °C	Температура нагрева, °C	Температура после нагрева, °C
1	20	120	20
2	20	170	20
3	20	220	20
4	0	250	20
5	–50	250	20

2. Охлаждение в морозильной камере

Для процессов нагрева и охлаждения используется печь с максимальной температурой 260 °C и морозильной камерой с минимальной температурой –60 °C. Всего было применено пять циклов, включая 17-часовое нагревание в печи и стадии охлаждения в каждом цикле. Охлаждение образцов производилось при комнатной температуре в лаборатории (~20 °C). Кроме того, в четвертом и пятом циклах образцы соответственно охлаждались до 0 °C (четвертый цикл) и –50 °C (пятый цикл), перед процессами нагрева до 250 °C в печи. Продолжительность стадии охлаждения в четвертом и пятом циклах составила 2 часа после охлаждения при комнатной температуре. В каждом цикле нагрева изменение температуры увеличивалось на 50 °C по сравнению с предыдущим. На последнем этапе образцы были взяты при температуре –50 °C и подвергались повышенной температуре на 250 °C (рис. 4).



а *б*

Рис. 4 – Холодильная камера и печь в лаборатории (а); измерение деформации охлаждения с помощью индикатора часового типа (*б*)

Fig. 4 – cold room and oven in the laboratory (*a*); measurement of the cooling deformation with a dial indicator (*b*)

После каждого процесса нагрева деформации образцов во время охлаждения на воздухе при комнатной температуре измерялись с помощью индикатора часового типа, как показано на рис. 4, *б*. После извлечения образца из печи потребовалось всего несколько секунд, чтобы начать измерение деформации. Укорочение

деформации при охлаждении считывали и отмечали изменения во времени. Следует отметить, что одни и те же образцы были испытаны при измерениях деформации после процессов нагрева, чтобы иметь возможность точно сравнивать изменения, вызванные тепловыми циклами. После завершения измерения деформации образцы выдерживали при комнатной температуре до начала следующего термического процесса. В целом, для 20 образцов керна были применены термические циклы в условиях охлаждения на воздухе.

После последнего термического цикла было проведено испытание на прочность при одноосном сжатии (UCS), чтобы оценить влияние нагрева-охлаждения на свойство потери прочности. Кроме того, испытание USC на других 20 образцах керна было выполнено без применения термических процессов для определения значений прочности горных пород перед нагревом и потерь прочности из-за термических циклов. Образцы горных пород, использованные в этом исследовании, были тщательно отобраны после визуальных наблюдений для проверки образцов керна на отсутствие, трещин, стыков заполнения и т. д.

3. Охлаждение в воде

Для охлаждения использовалась дистиллированная вода комнатной температуры. Процедура нагрева образцов, охлажденных в воде, была такой же, как и у образцов, охлажденных на воздухе. Процедура, приведенная в табл. 1, применялась для обоих условий охлаждения. Образцы помещали в ведра с водой для охлаждения на 30 минут, позже образцы стояли на воздухе почти 6,5 часов для следующего термического процесса перед вторым и третьим тепловыми циклами. Поскольку продолжительность процесса охлаждения печи составляла 2 часа, образцы выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение 4,5 часов перед процессом в четвертом и пятом циклах. Продолжительность нагрева в печи составляла 17 часов в каждом термическом цикле.

4. Результаты исследований

Результаты, полученные при испытаниях на пористость нагретых и ненагретых образцов, приведены в табл. 2. Табл. 3 включает время охлаждения до остановки укорачивания в зависимости от данных термической деформации, полученных при измерениях с помощью индикатора часового типа. Кроме того, уровни термической деформации при различных тепловых циклах показаны на рис. 5. Из-за невозможности измерения длины нагретого образца уровни деформации, приведенные в табл. 3 и на рис. 5, представляют собой отношение деформаций во время охлаждения к длине образцов, измеренных при комнатной температуре. Следовательно, его можно оценить как обратное измерение приблизительной деформации теплового расширения с начальной длиной при комнатной температуре. Данные о потере прочности приведены в табл. 4, включая результаты испытаний UCS для образцов до и после термических циклов. На образцах песчаника были видны трещины, а один из них, охлажденный на воздухе, имел видимый распад. Более того, два образца песчаника, охлажденные в воде, не могли быть использованы в испытании UCS из-за серьезной дезинтеграции (рис. 6). Образцы песчаника с проблемой дезинтеграции не были предпочтительны для использования в испытании UCS из-за изменения поперечного сечения. Образцы известняка, охлажденные в воде, также имели видимые и незначительные трещины в конце термических циклов. Параллельно с наблюдениями самая большая потеря прочности была обнаружена в образцах песчаника, за которыми следовали образцы известняка. Влияние термических циклов на потери прочности графически представлено на рис. 7.

Таблица 2 / Table 2

Результаты испытаний на пористость
Results of porosity tests

Тип образца	Перед тепловым циклом			После теплового цикла (воздух)			После теплового цикла (вода)		
	П	СД	№	П	СД	№	П	СД	№
Известняк	0,032	0,007	1	0,045	0,006	1	0,059	0,009	1
Кальцит	0,028	0,005	2	0,033	0,004	2	0,041	0,005	2
Карбонат	0,034	0,009	3	0,039	0,007	3	0,046	0,006	3
Песчаник	0,063	0,011	4	0,094	0,012	4	0,120	0,014	4
Доломит	0,039	0,004	5	0,046	0,005	5	0,058	0,007	5

П – пористость; СД – стандартное отклонение; № – номер образца; воздух – охлаждение на воздухе, вода – охлаждение в воде.

П – porosity; СД – standard deviation; № – sample number; воздух – air cooling; вода – water cooling.

Таблица 3/Table 3

Результаты измерений деформации
Results of strain measurements

Тип образца	Цикл 1		Цикл 2		Цикл 3		Цикл 4		Цикл 5	
	ε, (10^{-4})	*t*, мин	ε, (10^{-4})	*t*, мин	ε, (10^{-4})	*t*, мин	ε, (10^{-4})	*t*, мин	ε, (10^{-4})	*t*, мин
Известняк	0,73	21	1,02	29	1,39	35	1,68	42	1,58	39
Кальцит	0,62	20	0,81	32	1,09	45	1,20	54	1,22	55
Карбонат	1,10	16	1,41	22	1,78	27	1,99	33	1,93	32
Песчаник	0,28	15	0,45	20	0,67	24	0,65	28	0,59	24
Доломит	0,13	30	0,18	39	0,24	50	0,29	56	0,30	56

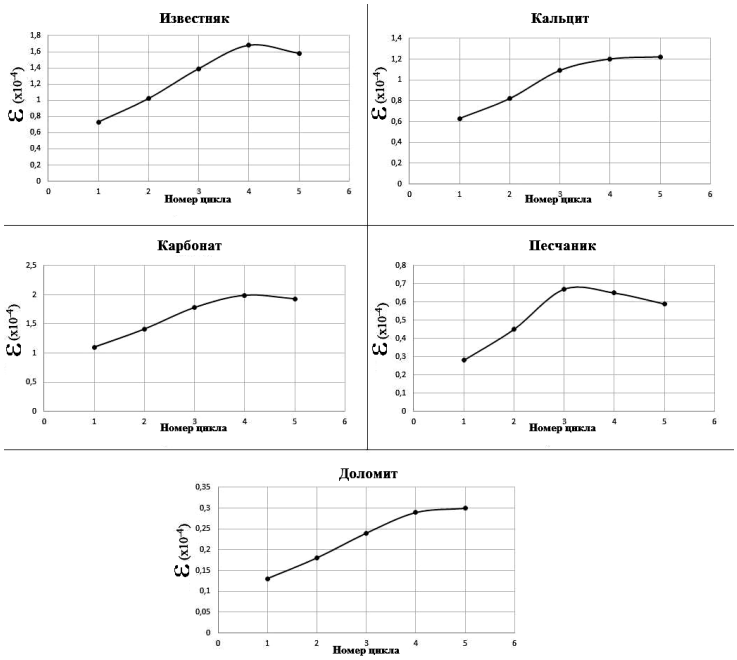


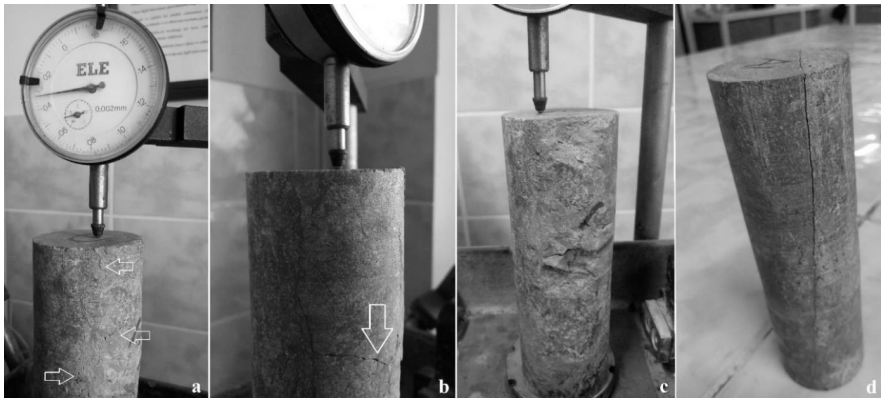
Рис. 5 – Деформация охлаждения при различных тепловых циклах (охлаждение на воздухе)

Fig. 5 – Cooling deformation at different thermal cycles (air cooling)

Таблица 4/Table 4

Результаты испытаний на прочность на одноосное сжатие (UCS)
Results of uniaxial compression strength (UCS) tests

Тип образца	Перед тепловым циклом			После теплового цикла (воздух)			После теплового цикла (вода)		
	UCS (МПа)	СД	№	UCS (МПа)	СД	№	UCS (МПа)	СД	№
Известняк	32,7	1,4	1	28,2	1,9	1	25,4	1,5	1
Кальцит	64,0	3,8	2	62,1	3,5	2	60,3	2,7	2
Карбонат	79,8	3,7	3	75,0	4,0	3	70,5	3,9	3
Песчаник	45,5	3,2	4	35,9	3,8	4	25,6	4,0	4
Доломит	82,4	2,9	5	80,7	3,3	5	78,2	3,5	5



а *б* *в* *г*

Рис. 6 – Некоторые формы трещин, наблюдаемые в ходе этого исследования:
а – узкие трещины; *б* – большие трещины; *в* – разрушение; *г* – распад длинной трещиной по всему образцу

Fig. 6 – Some of the fracture shapes observed during this study are:
a – narrow cracks; *b* – large cracks; *c* – fracture; *d* – long crack disintegration throughout the sample

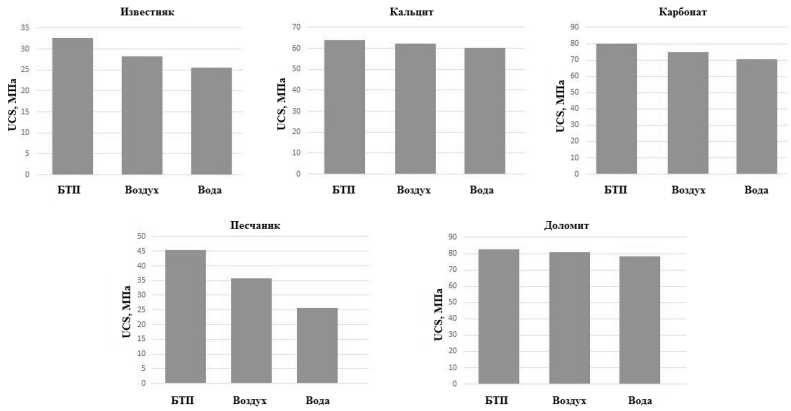


Рис. 7 – Изменение значений прочности на одноосное сжатие при различных условиях охлаждения (БТП: без термического процесса; воздух: охлаждение на воздухе; вода: охлаждение в воде)

Fig. 7 – Change in uniaxial compressive strength values under different cooling conditions (BTP: no thermal process; air: air cooling; water: water cooling)

Заключение

Как подтверждают результаты исследований, значения деформации охлаждения уменьшаются с увеличением числа тепловых циклов при одном и том же изменении температуры. Было подтверждено, что способность к термической деформации уменьшается с заметным увеличением пористости в результате микротрещин. Пределы термической деформации у образцов песчаника могут уменьшаться, несмотря на повышение температуры продолжающегося термического цикла.

Некоторые образцы известняка после пятого цикла имели узкие видимые трещины. Теплоемкость охлаждающей среды изменяет количество передаваемой энергии в процессе охлаждения образца. Например, образцы имеют более быструю потерю энергии и более быстрое охлаждение при изменении температуры на единицу в воде, а не в воздухе. Таким образом, образцы, охлажденные в воде, имели меньшее сопротивление изменению температуры по сравнению с образцами, охлаждаемыми на воздухе.

В качестве одного из важных результатов этого исследования было обнаружено, что охлаждающая деформация при увеличении числа тепловых циклов снижается после критического цикла. Эту ситуацию автор предлагает назвать потерей деформационной способности охлаждения. Определение потери способности к деформации охлаждения заключается в уменьшении деформации охлаждения по сравнению с таковой в предыдущем термическом цикле при таком же или увеличивающемся изменении температуры. Обычно ожидается, что тепловая деформация будет увеличиваться с увеличением изменения температуры в текущих тепловых циклах. Однако для горных материалов она уменьшается в случае потери деформационной способности охлаждения. Можно сказать, что эта ситуация является результатом ослабления из-за термической усталости.

Циклы нагрева и охлаждения привели к заметным потерям прочности и изменению физических свойств в зависимости от типа породы и охлаждающей среды. В частности, охлаждение в воде привело к значительным потерям прочности для всех образцов, а не на воздухе. Было обнаружено, что породы с высокими значениями потери прочности также имеют высокие потери холодопроизводительности по сравнению с породами с меньшими значениями потери прочности. Таким образом, потеря деформационной способности охлаждения была оценена как индикатор потери прочности. Результаты этого экспериментального исследования призваны внести вклад в новые исследования по разработке нового метода оценки влияния теплового изменения на свойство потери прочности материалов горных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 26450.1–85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением / Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
2. *Крюков Г.М.* Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. – М.: Горная книга, 2006. – 329 с.
3. *Ржевский В.В.* Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
4. *Габриэлянц Г.А.* Геология нефтяных и газовых месторождений. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
5. Справочник по геологии нефти и газа / под ред. Н.А. Еременко. – М.: Недра, 1984. – 480 с.
6. *Кузнецов В.Г.* Литология. Осадочные горные породы и их изучение. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 511 с.

INFLUENCE OF HEAT SHOCK ON THE STRENGTH PROPERTIES OF ROCKS: AN EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL FATIGUE STRENGTH

Lipatov N.V.
Tyumen State University, Tyumen, Russia
LLC "Koretest service", Tyumen, Russia

In the study, various rocks were heated to raise the values up to a temperature of 250 ° C, to determine the values of loss of strength and changes in physical properties, during thermal cycles. As a result of thermal stresses, micro-cracks or visible macro-cracks appear, which lead to noticeable loss of strength depending on various factors such as temperature, heating duration, cooling details and some rock properties such as mineralogical composition, grain size, porosity, microcracks before heating, process [2, 5]. The reason for the loss of strength during heating and cooling, variations in the deformation of various minerals cause cracking in the contacts of the minerals and the propagation of existing cracks.

This situation causes the physical weathering of rock materials. In addition, chemical weathering at high temperatures should be noted as one of the main causes of loss of strength due to thermal changes. In physical weathering, the mineralogical composition of rocks and the temperature level are the determining parameters for chemical weathering. Since temperatures in this study are generally not critical for the onset of chemical weathering, the study focused on physical weathering rather than chemical weathering.

Keywords: heat shock, strength properties, rocks, thermal strength, fatigue strength.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-32-40

REFERENCES

1. GOST 26450.1-85 Mountain rocks. Method for determining the coefficient of open porosity by liquid saturation // State Committee of the USSR for Standards, Moscow, 1985.
2. Kryukov G.M. Physics of destruction of rocks during drilling and blasting // Publishing house of the Moscow State Mining University, Gornaya Kniga, Moscow, 2006.
3. Rzhevsky V.V. Fundamentals of Rock Physics // Nedra, Moscow, 1978.
4. Gabrielyants G.A. Geology of oil and gas fields. – Moscow : Nedra, 1984.
5. Eremenko N.A. Handbook of oil and gas geology // Nedra, Moscow, 1984.
6. Kuznetsov V.G. Lithology. Sedimentary rocks and their study // Nedra-Business Center, Moscow, 2007.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Липатов Никита Владимирович – родился в 1993 г. Аспирант 4 курса Тюменского государственного университета, инженер лаборатории механических исследований ООО «Корэтест Сервис». Область научных интересов: теплофизика и теоретическая теплотехника. (Адрес: 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Ленина 2а, оф. 002. E-mail: Lipatov.n.v@mail.ru).

Lipatov Nikita Vladimirovich (b. 1993) – 4th year post-graduate student of Tyumen State University, Engineer of the Mechanical Research Laboratory, Koretest Service LLC. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat engineering. (Address: office 002, 2a Lenin St., Tyumen, 625003, Russia. E-mail: Lipatov.n.v@mail.ru).

Статья поступила 17 ноября 2020 г.
Received November 17, 2020

To Reference:

Lipatov N.V. Vliyanie teplovogo udara na prochnostnye svoistva gornykh porod: eksperimental'noe issledovanie termicheskoi ustalostnoi prochnosti [Influence of heat shock on the strength properties of rocks: an experimental study of thermal fatigue strength]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 32–40. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-32-40.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2020 октябрь–декабрь № 4 (49)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 533.9.07

ПОВЫШЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗОННОЙ ИНЖЕНЕРИЕЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ПОЛЕВОГО КАТОДА

Н.И. Петров[1,2], Т.Л. Антонова[2]
[1] *Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета*
[2] *Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева*

С быстрым развитием космической техники масштабы освоения космоса человечеством значительно расширяются. Тем не менее растущие потребности в полетах в дальний космос не могут быть удовлетворены с помощью обычных химических двигателей. Таким образом, ясной становится потребность в новых механизмах обеспечения реактивной тяги, включая электрические двигатели. Технология электрического движения имеет значительные преимущества перед традиционными химическими двигателями в полете в глубоком космосе благодаря своим характеристикам, таким как высокий удельный импульс, малые размеры, длительный срок службы. Негативной особенностью электрических двигателей можно назвать малую тягу, однако, во-первых, в открытом космосе это несущественно и во-вторых, тягу электрических двигателей можно существенно увеличить, и для этого существуют резервы, доступные на современном уровне развития техники. Пути повышения тяги электрических ионных двигателей будут детально изложены и обсуждены в настоящей работе. Рост мощности ионных двигателей ограничивается в значительной мере эрозией управляющих сеток, поток ионов поражает поверхность твердого материала управляющего сеточного электрода энергичными ионами и постепенно приводит к выходу из строя этого электрода. В данной работе показано, что использование полевой эмиссии как источника ионизирующих рабочее тело пучков электронов, способно решить проблему эрозии управляющих электродов, за счет чего можно будет существенно поднять напряженности рабочих полей для ионных двигателей, что в свою очередь, позволит увеличить удельный импульс, эффективность, скорость истечения и мощность ионного двигателя в целом.

Ключевые слова: электрические двигатели, повышение тяги, спутники длительных миссий, нанотехнологии, полевой эмиссионный катод, космические аппараты.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-41-50

Введение

В последние месяцы 2020 года на Землю вернулась спускаемая капсула японского зонда Хаябуса-2, эта миссия знаменует собой уже ставший почти рутинным забор образцов грунта с астероидов. Такая миссия стала возможной из-за превосходных рабочих характеристик ионных двигателей, как иллюстрацию этого тезиса можно привести дальнейшую судьбу зонда Хаябуса-2 – он отправился в следующую миссию, его ресурс не израсходован полностью. Ионные двигатели – это будущее космонавтики за пределами земной орбиты. Россия тут на переднем крае уровня техники с разрабатываемым проектом транспортно-энергетического модуля «Ядерным Буксиром». Двигателем для нового слова в космической технике будет ионный привод ИД-500 [1].

За последние десятилетия по всему миру было разработано и используется в космических полетах множество типов электрических двигателей [2]. Электрические двигательные установки в основном можно разделить на три класса: электротермические, электростатические и электромагнитные. Среди них ионные

© 2020 Н.И. Петров, Т.Л. Антонова

двигатели Холла и решетчатые ионные двигатели являются наиболее передовыми и зрелыми технологиями. Обычно для этих двигателей малой тяги требуются источники электронов, катоды для подачи первичных электронов в разрядную камеру ионного двигателя малой тяги, нейтрализаторы радиочастотного (ВЧ)/микроволнового разряда для подачи свободных электронов для нейтрализации ионов в шлейфе. Кроме того, все большее внимание привлекают небольшие космические аппараты и спутники длительных миссий, которым необходим длительный ресурс маневрирования (например, Хаябуса [3] и Хаябуса-2 [4]).

Небольшие космические аппараты или спутники очень эффективны для выполнения дистанционного зондирования Земли, точного земледелия, мониторинга эрозии и загрязнения моря, точного прогнозирования погоды и так далее. Кроме того, небольшие космические корабли или спутники также могут быть эффективно использованы для исследования нашей Солнечной системы и за ее пределами. С другой стороны, растущий рынок малых космических аппаратов определяет даже более строгие требования к источникам электронов с малым весом и низким энергопотреблением. Большинство предыдущих источников электронов – это термоэлектронные и полые катоды, обеспечивающие более высокий электронный ток [5–7]. Однако для генерации свободных электронов в таких катодах необходимо нагревательное устройство, что приводит к повышенному энергопотреблению и тепловой нагрузке. Кроме того, потребность в дополнительных энергомощностях также приводит к повышенной массе и сложной системе поддержки космического аппарата, что создает дополнительную нагрузку в космических полетах.

Автоэмиссионные катоды, или катоды с полевой эмиссией (FEC), представляют собой многообещающую альтернативу из-за следующих преимуществ: в FEC не расходуется топливо и можно увеличить импульс, характерный для всей системы; снижение требований к мощности двигательной установки. В частности, FEC на основе углеродных нанотрубок (УНТ) стали популярными в последние десятилетия и продемонстрировали множество возможностей применения [8] в инструментах рентгеновской визуализации [9], компактной масс-спектрометрии [10], вакуумных ламп [11].

Нанотехнологии очень полезны для будущих перспективных, адаптивных космических аппаратов. В этой статье наша цель – не расширять круг предыдущих обсуждений, а сосредоточить внимание на прогрессе в области применения CNT-FEC, в частности в космических электрических двигательных системах для использования в качестве нейтрализатора космического аппарата или источника электронов для ионизации рабочего тела.

1. Особенности теории полевой эмиссии

Чтобы высвободить электроны, захваченные внутри твердого материала (например, полупроводника или металла), можно использовать два метода: один добавляет энергию захваченным электронам, а другой уменьшает высоту и ширину потенциального барьера на границе твердое тело/вакуум. В прошлом часто в приложениях, требующих эмиссии электронов, прибегали к термоэмиссии. При термоэлектронной эмиссии твердый материал нагревается до высокой температуры (>1000°C), электроны в этом твердом теле приобретают большую кинетическую энергию, поэтому захваченные электроны могут иметь достаточную энергию для преодоления потенциального барьера материала. При полевой эмиссии внешнее электрическое поле повышается до таких значений, что потенциальный барьер твердое тело/вакуум истончается, теряет свою высоту, при этом электроны из твердого тела могут туннелировать сквозь этот барьер непосредственно в вакуум.

Квантовомеханическое явление туннелирования электронов в вакуум при автоэлектронной или полевой эмиссии, по мнению многих исследователей, для применений в ионных двигателях космических аппаратов может иметь качественное преимущество перед катодами на термоэмиссии, преимущество, обусловленное невозмущенным спектром носителей заряда, эмитируемых в вакуум. Если в случае термоэмиссии носители будут иметь распределение по энергиям, описываемое приближением максвеллова распределения, независимо от природы твердого тела, служащего материалом катода, то в случае полевой эмиссии спектр распределения носителей будет в значительной степени определяться спектром носителей в твердом теле [12].

Упрощенно можно сказать, что спектр эмитированных носителей будет представлять собой спектр энергораспределения носителей в твердом теле после воздействия на него оператора туннельной прозрачности (вероятности туннелирования через треугольный барьер на границе твердое тело/вакуум). Это явление даже можно использовать для экспериментальной фиксации особенностей спектра носителей в твердом теле по виду вольт-амперных характеристик полевой эмиссии. Также это явление имеет полезное в рамках обсуждаемого подхода следствие: манипулируя видом спектра носителей заряда твердого тела, можно изменять спектр эмитированных электронов [13].

2. Характеристики полевой эмиссии на основе углеродных нанотрубок

Используя вышеупомянутые описания, мы отмечаем, что для запуска процесса полевой эмиссии требуются высокие напряженности электрического поля. В последние десятилетия обычным способом получения сильного электрического поля было использование очень острого катода с диаметром острия в несколько сотен нанометров с использованием разработок в области микро- и нанотехнологий. Таким образом, сильное усиление поля может быть получено на острие электрода и, следовательно, внешнее электрическое напряжение запуска и извлечения может быть уменьшено до нескольких сотен вольт или даже меньше.

С 1960-х годов Spindt-катоды стали наиболее популярными и успешными катодами для автоэлектронной эмиссии, что во многом объясняется их интегрированностью в хорошо развитые микроэлектронные технологии (такие как фотолитография и пр.). Обычно для изготовления наконечников эмиттеров использовались молибден или вольфрам из-за их высокой температуры плавления. Но с развитием микроэлектроники в технологии изготовления преобладали эмиттеры с кремниевым наконечником, и во всем мире все больше и больше использовались массивы полевых катодов Spindt-типа [14]. До сих пор максимальный ток эмиссии от одного наконечника мог достигать 1 мА, а максимальная плотность тока превышала 2000 А/см^2 для FEC типа Spindt [15]. Однако с увеличением количества применений катодов типа Spindt в вакуумных электронных устройствах внутренние слабые места этого типа эмиттеров постепенно стали очевидными и привели к сбоям в эмиссии электронов, в частности в сложных плазменных средах. К этим недостаткам относятся следующие: эффективность излучения сильно зависит от качества самого острого наконечника и со временем уменьшается, равномерность эмиссии электронов становится низкой, а частые катастрофические дуги вызывают локальное и сильное повышение температуры, которое может повредить все устройство [16].

Многослойная УНТ состоит из нескольких однослойных УНТ, вложенных друг в друга. Один атом углерода связан с тремя другими атомами углерода. Таким образом, энергия активации для поверхностной миграции атомов эмиттера очень велика и может выдерживать интенсивное внешнее электрическое поле,

необходимое для автоэлектронной эмиссии [17]. Электроны извлекаются из наконечников УНТ, кривизна наконечников может быть намного меньше, чем у обычных острых металлических наконечников. По сравнению с другими типами полевых эмиттеров УНТ обладает следующими свойствами [18]:

– отличная проводимость и рассеивание тепла;

– чрезвычайно большой модуль Юнга и максимальная прочность на разрыв (~ 200 ГПа);

– низкий коэффициент испарения, что очень полезно в качестве источника электронов, на который могут приходиться бомбардирдировки разных частиц;

– химически инертный материал, с которым затруднены химические реакции, за исключением экстремальных условий или высокой температуры;

– наноразмерное высокое соотношение сторон (может достигать 10^5), что приводит к сильному усилению поля на концах для облегчения полевой эмиссии.

Как правило, для синтеза УНТ часто используются химическое осаждение из паровой фазы (CVD) и метод дугового разряда. В частности, метод дугового разряда способствует получению УНТ с низким уровнем дефекта, улучшая характеристики автоэмиссии. Обратите внимание, что теория Фаулера–Нордхейма может частично описывать процесс полевой эмиссии из полевого эмиттера УНТ в определенном диапазоне тока, но не может объяснить, что порог эмиссии УНТ ниже, чем у обычных металлических эмиттеров, таким образом, полная теория полевой эмиссии из углеродных нанотрубок все еще исследуется.

3. Последние достижения CNT-FEC в космических двигателях

В 1995 г. было сообщено о характеристиках полевой эмиссии CNT. С тех пор во всем мире были предприняты многочисленные попытки применения CNTFEC. Интерес к использованию CFN-FEC в космических двигательных установках был заявлен в публикациях в начале двухтысячных годов [19]. В этом разделе мы конкретно резюмируем разработку двух типичных приложений: нейтрализатора или источника электронов потенциальных электрических двигательных систем.

CNT-FEC служит нейтрализатором космических силовых установок. В 2001 году Маррез–Ридинг и др. [20] из JPL продемонстрировали нейтрализацию заряда автоэмиссионного электрического двигателя (FEEP) малой тяги с тремя источниками электронов: термоэлектронным катодом из смешанных металлов, CNT-FEC и катодом с полевой эмиссией из молибдена типа Spindt. Эксперименты показали, что CNTFEC может значительно снизить соотношение мощности к силе тяги на 50 % в условиях их испытаний, что в то время было очень вдохновляющим. FEC был выращен на кремниевой основе с помощью процесса CVD, который продемонстрировал 160 мкА при приложенном напряжении 380 В на электроде затвора с током 1,3 мА. Эффективность CNT-FEC лучше, чем у термоэмиссионного катода, нормированного на уровень тока, но во время испытаний он показал нестабильную работу, поскольку более чувствителен к условиям окружающей среды из-за процесса ионного распыления, возникающего вблизи наконечников.

В 2007 году Такао и др. [21] провели эксперимент по проверке возможности использования CNT-FEC в качестве нейтрализатора для малогабаритного ионного двигателя с микроволновым разрядом. Они изготовили два типа CNT-FEC: первый тип – это однослойные УНТ, медная пластина с цилиндрическим отверстием, заполненным однослойными УНТ (диаметром 2 мм и глубиной 0,5 мм); второй тип – графитовый диск диаметром 2 мм, погруженный в медную пластину. Эксперименты показали, что ток электронов 0,56 мА может быть достигнут с помощью

однослойных УНТ при приложенном напряжении 380 В и расстоянии между электродами 0,5 мм. Обратите внимание, что межэлектродный интервал сильно влияет на ток извлекаемых электронов во время испытаний, указывая на то, что однослойный катод из УНТ очень подходит для нейтрализатора для малогабаритного ионного двигателя микроволнового разряда, но приложенное напряжение может быть уменьшено из-за потери энергии. Кроме того, катод из графитового диска требует гораздо большего приложенного напряжения, чем однослойные УНТ, которое превышает 1500 В. Это связано с тем, что графитовый диск не обрабатывался дуговым разрядом.

Веласкес–Гарсия и Акинванде [22] из Массачусетского технологического института сообщили об испытании нейтрализатора на основе MEMS CNT для микродвигательных установок в 2007 году. CNT-FEC изготавливается с помощью технологии химического осаждения из паровой фазы, усиленной плазмой, которая позволяет им устанавливать небольшой и однородный интервал между эмиттером и сеткой, тем самым снижая необходимое напряжение для электронной эмиссии. ВАХ эмиттера были получены с использованием триодной конфигурации, максимальный ток затвора 2,1 мА был измерен при приложенном напряжении 375 В. Их эксперименты также подтвердили, что теория Фаулера–Нордхейма может в основном описывать электронную эмиссию из подложки УНТ.

В 2019 году Ямамото и др. [23] дополнительно исследовали демонстрацию CNT-FEC в качестве нейтрализатора для микроволнового ионного двигателя малой тяги. Размер FEC составляет 88 × 88 мм^2, а максимальный ток эмиссии составляет 20 мА при разности потенциалов 500 В между сеткой затвора и эмиттером. CNT-FEC был установлен на расстоянии 20 см от ионного двигателя малой тяги. Он подтвердил, что эмиссионный ток от FEC хорошо сбалансирован с током ионного пучка из камеры двигателя. Слабым местом является очень высокая стоимость эмиссии электронов, которая достигает 360 Вт/А, что намного выше, чем у обычного полого катода (≤ 30 Вт/А). Однако общий удельный импульс системы в 1,25 раза выше, чем у обычной системы ионного двигателя малой тяги с собственными нейтрализаторами микроволнового разряда, кроме того, для CNT-FEC снижен расход рабочего тела, что является очень конкурентоспособным.

Как правило, причиной выбора CNT-FEC являются низкое напряжение извлечения, высокая эффективность извлечения электронов и долговечность. Эксперимент показал, что снижение плотности тока эмиссии помогает продлить срок службы FEC в течение 50 часов испытаний, а в течение 1500 часов работы не наблюдалось серьезных пробоев и коротких замыканий. К тому же срок службы FEC может быть даже больше, чем 1500 часов на реальной орбите из-за более низкой плотности газа. В 2017 году JAXA проводит на орбите демонстрацию CNT-FEC EDT на транспортном средстве H-II 6 (HIV-6) в Японии, миссия называется Kounotori Integrated Tether Experiment.

Стоит отметить, что HTV-6 был запущен в декабре 2016 года, а KITE – в январе 2017 года, после того как HTV-6 покинул Международную космическую станцию МКС. Рабочая орбита во время полета составляла около 370 км. Для подачи электрического тока через трос с начала 2013 года было разработано восемь CNT-FEC, которые были построены весной 2016 года. Устойчивость CNT-FEC к атомарному кислороду (АО) очень низкая. Поверхность эмиттера электронов летной модели устанавливалась параллельно оси орбитального движения, чтобы избежать прямого воздействия потока АО. Эксперимент JAXA показал, что все восемь CNT-FEC очень хорошо работают на орбите; общее время работы составляет 50 часов при общем времени воздействия 130 часов. Измеренные максимальные

ток эмиттера (эмиттер электронного тока из эмиттеров УНТ) и ток эмиссии (ток электронов, выводимый наружу) составляют 10 и 6 мА соответственно [24]. Кроме того, были записаны ВАХ одиночного FEC, полученные на различных этапах. Было обнаружено, что почти не изменились характеристики после 10 и 60 часов воздействия, что указывает на то, что CNT-FEC, по крайней мере, может работать в условиях облучения и плазмы 1019 ат/см^2. Отметим, что текущий эксперимент проводился на высоте 370 км, где плотность остаточного нейтрального газа намного выше нормальной орбиты спутников (около 600…1400 км).

4. Выводы

CNT-FEC как многообещающий источник электронов хорошо зарекомендовал себя как идеальный кандидат в нейтрализатор космического аппарата и/или источник электронов для ионизации рабочего тела в космических электрических двигательных установках. Несмотря на то что было предпринято множество теорий, моделирования и экспериментов, многие аспекты все еще не полностью поняты, и необходимы дальнейшие усилия, прежде чем использовать CNT-FEC в качестве общего источника электронов в космической двигательной установке.

Мы обозначим некоторые существующие проблемы и возможные решения, а также прогнозируем дальнейшее потенциальное развитие технологии CNT в космических полетах. Теоретическая проблема: мы проиллюстрировали, что хорошо известная теория Фауллера–Нордхейма обычно используется для описания автоэмиссионного процесса. Фактически, многие предположения использовались для теории Фауллера–Нордхейма, так как электроны подчиняются распределению Ферми–Дирака, поверхность металла достаточно гладкая без учета шероховатости, потенциальный барьер создается поляризацией. Размер УНТ находится в наномасштабе, электроны в основном испускаются из их острых концов, поэтому предположение теории Фауллера–Нордхейма о плоской и гладкой эмиссионной поверхности больше не является справедливым в строгом смысле для эмиттеров УНТ. Новая теория требует дальнейшего изучения, чтобы лучше выразить процесс автоэлектронной эмиссии УНТ. Хотя теорию Фауллера–Нордхейма можно использовать в качестве инструмента проверки экспериментальных испытаний в определенном диапазоне токов с введением поправочного коэффициента, учитывающего кривизну острия эмиттера.

Из-за ограниченности технологий изготовление одной УНТ очень сложно, вместо этого изготавливается связка УНТ, что приводит к так называемому пределу пространственного заряда. В одной и той же среде длина двух соседних УНТ может быть разной, поэтому только несколько самых длинных УНТ будут излучать электроны после приложения внешнего сильного электрического поля, что влияет на эффективность и однородность излучения. Эта проблема должна быть решена еще на стадии изготовления. В прошлом для изготовления УНТ использовалось множество подходов, таких как узорчатый рост пучков УНТ с помощью химического осаждения из паровой фазы на полупроводниковых или металлических подложках и узорное электрофоретическое осаждение красок на основе УНТ. Или некоторые недавние подходы, такие как трафаретная печать и так далее. Помимо эффективности выбросов, высокая эффективность извлечения также направлена на дальнейшее снижение мощности, потребление и подавление тепловой нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Development of ion thruster IT-500 / A.S. Koroteev, A.S. Lovtsov, V.A. Muravlev, M.Y. Selivanov, A.A. Shagayda // The European Physical Journal D. – 2017. – Vol. 71. – P. 120. – DOI: 10.1140/epjd/e2017-70644-6.
2. Review of multimode space propulsion / J.L. Rovey, C.T. Lyne, A.J. Mundahl, N. Rasmont, M.S. Glascock, M.J. Wainwright, S.P. Berg // Progress in Aerospace Sciences. – 2020. – Vol. 118. – P. 100627.
3. Special issue "Science of solar system materials examined from Hayabusa and future missions (II)" / T. Okada, R.P. Binzel, H.C. Connolly, T. Yada, K. Ohtsuki // Earth, Planets and Space. – 2017. – Vol. 69. – P. 31. – DOI: 10.1186/s40623-017-0617-3.
4. **Sarli B.V., Yuichi T.** Hayabusa 2 extension plan: Asteroid selection and trajectory design // Acta Astronautica. – 2017. – Vol. 138. – P. 225–232.
5. **Cherkun O., Demet U.** Cesium hollow cathode with internal discharge and gas feed for electric propulsion applications // The 35th International Electric Propulsion Conference. – USA: Georgia Institute of Technology, 2017.
6. The Rafael Power Processing Unit (PPU) for electric propulsion systems / B. Shoor, A. Davidson, D. Lev, L. Appel, O. Epstein, J. Herscovitz // International Electric Propulsion Conference. – Austria: University of Vienna, 2019.
7. REGULUS: A propulsion platform to boost small satellite missions / M. Manente, F. Trezzolani, M. Magarotto, E. Fantino, A. Selmo, N. Bellomo, E. Toson, D. Pavarin // Acta Astronautica. – 2019. – Vol. 157. – P. 241–249.
8. Multiwall carbon nanotubes: Synthesis and application / R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, T. Rantell // Accounts of Chemical Research. – 2002. – Vol. 35 (12). – P. 1008–1017.
9. Stationary intraoral digital tomosynthesis using carbon nanotubes field emission x-ray technology: Clinical prototype / E. Platin, A. Tucker, O. Zhou, J. Lu // Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology. – 2020. – Vol. 130 (2). – P. e66.
10. Carbon nanotubes as assisted matrix for laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry / S. Xu, Y. Li, H. Zou, J. Qiu, Z. Guo, B. Guo // Analytical Chemistry. – 2003. – Vol. 75 (22). – P. 6191–6195.
11. Performances improvement of vacuum tubes using carbon nanotubes embedded cathodes / Tsai, J.T.H., Peng, J., Chu, K., Chen, J.S. // Vacuum. – 2017. – Vol. 145. – P. 1–3.
12. Influence of the emitted electron energy distribution from nanocathodes upon the current-voltage characteristics / Evtukh, A., Grygoriev, A., Litovchenko, V.G., Pylypova, O. // Journal of Vacuum Science and Technology B. – 2014. – Vol. 32 (2). – P. 02B104–02B104-4.
13. **Litovchenko V., Evtukh A., Grygoriev A.** Characterization of GaN nanostructures by electron field and photo-field emission // Opto-Electronics Review. – 2017. – Vol. 25 (3). – P. 251–262.
14. **Forman R.** Evaluation of the emission capabilities of Spindt-type field emitting cathodes // Applications of Surface Science. –1983. – Vol. 16 (1–2). – P. 277–291.
15. Nanodiamond thin film field emitter cartridge for miniature high-gradient radio frequency X-band electron injector / J. Qiu, S.S. Baturin, K.K. Kovi, O. Chubenko, G. Chen, R. Konecny, S. Antipov, A.V. Sumant, C. Jing, S.V. Baryshev // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2018. – Vol. 65 (3). – P. 1132–1138.
16. Thermal runaway of metal nano-tips during intense electron emission / A. Kyritsakis, M. Veske, K. Eimre, V. Zadin, F. Djurabekova // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 51 (22). – P. 225203.
17. **Egorov N.V., Sheshin E.P.** On the current state of field-emission electronics // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2017. – Vol. 11 (2). – P. 285–294.
18. **Èidelman E.D., Arkhipov A.V.** Field emission from carbon nanostructures: Models and experiment // Physics-Uspekhi. – 2020. – Vol. 63 (7). – P. 648.
19. **Marrese C.M.** A review of field emission cathode technologies for electric propulsion systems and instruments // 2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings. – 2000. – Vol. 4. – P. 85–98.
20. In-FEEP thruster ion beam neutralization with thermionic and field emission cathodes / C. Marrese-Reading, J. Polk, J. Mueller, A. Owens // 27th International Electric Propulsion Conference. – Pasadena, 2001.

21. Development of neutralizer with carbon nanotube cathode for small scale ion engine / Y. Takao, A. Kugimiya, S. Nagai, N. Yamamoto, H. Nakashima // 30th International Electric Propulsion Conference. – Florence, Italy, 2007.
22. **Velásquez–García L.F., Akinwande A.I.** A MEMS CNT-based neutralizer for micro-propulsion applications // 30th International Electric Propulsion Conference. – Florence, Italy, 2007.
23. Ion thruster operation with carbon nanotube field emission cathode / N. Yamamoto, T. Morita, Y. Ohkawa, M. Nakano, I. Funaki // Journal of Propulsion and Power. – 2019. – Vol. 35 (2). – P. 490–493.
24. Review of KITE–Electrodynamic tether experiment on the H-II Transfer Vehicle / Y. Ohkawa, S. Kawamoto, T. Okumura, K. Iki, H. Okamoto, K. Inoue, T. Uchiyama, D. Tsujita // Acta Astronautica. – 2020. – Vol. 177. – P. 750–758.

INCREASING THE SPECIFIC IMPULSE OF THE ION ENGINE BY ZONE ENGINEERING OF THE SOLID-STATE FIELD CATHODE

Petrov N.I.[1,2], Antonova T.L.[2]
[1] *Mytishchi Branch of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Mytishchi, Russia*
[2] *D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

With the rapid development of space technology, the scale of human space exploration is expanding significantly. However, the growing demand for deep space travel cannot be met with conventional chemical engines. Thus, the need for new mechanisms for providing jet thrust, including electric motors, becomes clear. Electric propulsion technology has significant advantages over traditional chemical engines in deep space flight due to its characteristics such as high specific impulse, small size, long service life. A negative feature of electric motors can be called low thrust, however, firstly, in open space this is insignificant and, secondly, the thrust of electric motors can be significantly increased, and for this, there are reserves available at the current level of technology development. Ways to increase the thrust of electric ion thrusters will be detailed and discussed in this work. The increase in the power of ion engines is limited to a large extent by the erosion of the control grids, the ion flow hits the surface of the solid material of the control grid electrode with energetic ions and gradually leads to the failure of this electrode. In this work, the authors will show that the use of field emission as a source of electron beams ionizing the working medium can solve the problem of erosion of control electrodes, due to which it will be possible to significantly increase the strength of the working fields for ion engines, which in turn will increase the specific impulse, efficiency, flow rate and power of the ion engine as a whole.

Keywords: electric motors, thrust enhancement, satellites for long-term missions, nanotechnology, field emission cathode, spacecraft.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-41-50

REFERENCES

1. Koroteev A.S. Lovtsov A.S., Muravlev V.A., Selivanov M.Y., Shagayda A.A. Development of ion thruster IT-500. *The European Physical Journal D*, 2017, vol. 71, p. 120. DOI: 10.1140/epjd/e2017-70644-6.
2. Rovey J.L., Lyne C.T., Mundahl A.J., Rasmont N., Glascock M.S., Wainwright M.J., Berg S.P. Review of multimode space propulsion. *Progress in Aerospace Sciences*, 2020, vol. 118, p. 100627.
3. Okada T., Binzel R.P., Connolly H.C., Yada T., Ohtsuki K. Special issue “Science of solar system materials examined from Hayabusa and future missions (II)”. *Earth, Planets and Space*, 2017, vol. 69, p. 31. DOI: 10.1186/s40623-017-0617-3.
4. Sarli B.V., Yuichi T. Hayabusa 2 extension plan: Asteroid selection and trajectory design. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 138, pp. 225–232.

5. Cherkun O., Demet U. Cesium hollow cathode with internal discharge and gas feed for electric propulsion applications. *The 35th International Electric Propulsion Conference*, Georgia Institute of Technology, 2017.
6. Shoor B., Davidson A., Lev D., Appel L., Epstein O., Herscovitz J. The Rafael Power Processing Unit (PPU) for electric propulsion systems. *International Electric Propulsion Conference*, Austria, University of Vienna, 2019.
7. Manente M., Trezzolani F., Magarotto M., Fantino E., Selmo A., Bellomo N., Toson E., Pavarin D. REGULUS: A propulsion platform to boost small satellite missions. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 157, pp. 241–249.
8. Andrews R., Jacques D., Qian D., Rantell T. Multiwall carbon nanotubes: Synthesis and application. *Accounts of Chemical Research*, 2002, vol. 35 (12), pp. 1008–1017.
9. Platin E., Tucker A., Zhou O., Lu J. Stationary intraoral digital tomosynthesis using carbon nanotubes field emission x-ray technology: Clinical prototype. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 2020, vol. 130 (2), p. e66.
10. Xu S., Li Y., Zou H., Qiu J., Guo Z., Guo B. Carbon nanotubes as assisted matrix for laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 2003, vol. 75 (22), pp. 6191–6195.
11. Tsai J.T.H., Peng J., Chu K., Chen J.S. Performances improvement of vacuum tubes using carbon nanotubes embedded cathodes. *Vacuum*, 2017, vol. 145, pp. 1–3.
12. Evtukh A., Grygoriev A., Litovchenko V.G., Pylypova O. Influence of the emitted electron energy distribution from nanocathodes upon the current-voltage characteristics. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 2014, vol. 32 (2), pp. 02B104–02B104-4.
13. Litovchenko V., Evtukh A., Grygoriev A. Characterization of GaN nanostructures by electron field and photo-field emission. *Opto-Electronics Review*, 2017, vol. 25 (3), pp. 251–262.
14. Forman R. Evaluation of the emission capabilities of Spindt-type field emitting cathodes. *Applications of Surface Science*, 1983, vol. 16 (1–2), pp. 277–291.
15. Qiu J., Baturin S.S., Kovi K.K., Chubenko O., Chen G., Konecny R., Antipov S., Sumant A.V., Jing C., Baryshev S.V. Nanodiamond thin film field emitter cartridge for miniature high-gradient radio frequency X-band electron injector. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, vol. 65 (3), pp. 1132–1138.
16. Kyritsakis A., Veske M., Eimre K., Zadin V., Djurabekova F. Thermal runaway of metal nano-tips during intense electron emission. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51 (22), p. 225203.
17. Egorov N.V., Sheshin E.P. On the current state of field-emission electronics. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, vol. 11 (2), pp. 285–294.
18. Èidelman E.D., Arkhipov A.V. Field emission from carbon nanostructures: Models and experiment. *Physics-Uspekhi*, 20202, vol. 63 (7), p. 648.
19. Marrese C.M. A review of field emission cathode technologies for electric propulsion systems and instruments. *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings*, 2000, vol. 4, pp. 85–98.
20. Marrese-Reading C., Polk J., Mueller J., Owens A. In-FEEP thruster ion beam neutralization with thermionic and field emission cathodes. *27th International Electric Propulsion Conference*, Pasadena, 2001.
21. Takao Y., Kugimiya A., Nagai S., Yamamoto N., Nakashima H. Development of neutralizer with carbon nanotube cathode for small scale ion engine. *30th International Electric Propulsion Conference*, Florence, Italy, 2007.
22. Velásquez-García L.F., Akinwande A.I. A MEMS CNT-based neutralizer for micropropulsion applications. *30th International Electric Propulsion Conference*, Florence, Italy, 2007.
23. Yamamoto N., Morita T., Ohkawa Y., Nakano M., Funaki I. Ion thruster operation with carbon nanotube field emission cathode. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, vol. 35 (2), pp. 490–493.
24. Ohkawa Y., Kawamoto S., Okumura T., Iki K., Okamoto H., Inoue K., Uchiyama T., Tsujita D. Review of KITE–Electrodynamic tether experiment on the H-II Transfer Vehicle. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 177, pp. 750–758.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Николай Иванович – родился в 1967 году, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра прикладной механики и математики, Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета; кафедра физики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Область научных интересов: физика конденсированного состояния, теоретическая физика. Опубликовано 14 научных работ. (Адрес: 141006, Россия, Мытищи, Олимпийский пр., 50. E-mail: petrov6414@unesp.co.uk).

Petrov Nikolay Ivanovich (b. 1967) – Candidate of Sciences (Phys & Math.), Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Mathematics, Mytishchi Branch of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); Department of Physics, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. His research interests are currently focused on condensed matter physics, theoretical physics. He is author of 14 scientific papers. (Address: 50 Olimpiyskiy Av., Mytishchi, 141006, Russia. E-mail: petrov6414@unesp.co.uk).

Антонова Тамара Леонидовна – родилась в 1949 году, канд. хим. наук, доцент, кафедра физики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Область научных интересов: физическая химия. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 125047, Россия, Москва, Миусская пл., 9. E-mail: antonova6414@national-univesity.info).

Antonova Tamara Leonidovna (b. 1949) – PhD in Chemistry, Associate Professor, Department of Physical Chemistry, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. Her research interests are currently focused on physical chemistry. She is author of 10 scientific papers. (Address: 9 Mjusskaja Sq., Moscow, 125047, Russia. E-mail: antonova6414@national-univesity.info).

Статья поступила 10 декабря, 2020
Received December 10, 2020

To Reference:

Petrov N.I., Antonova T.L. Povyshenie udel'nogo impul'sa ionnogo dvigatelya zonnoi inzheneriei tverdotel'nogo polevogo katoda [Increasing the specific impulse of the ion engine by zone engineering of the solid-state field cathode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 41–50. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-41-50.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2020 октябрь–декабрь № 4 (49)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.321

ОБЛАСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПИДД$_2$-РЕГУЛЯТОРОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

А.В. Чехонадских
Новосибирский государственный технический университет

Объектом исследования послужила система нелинейных дифференциальных и функциональных уравнений, описывающая синхронный генератор. ПИДД$_2$-управление осуществлялось через блок возбуждения. Действующие значения установившегося режима в относительных единицах и предварительные настройки субоптимальных регуляторов были получены ранее с помощью линеаризованной модели. Возмущающие скачки (всплески и просадки) напряжения на шинах моделировались с помощью изменений импеданса линии. Стабилизация системы изучалась при различных величинах скачков и значениях параметров регулятора с помощью серии численных экспериментов; расчеты велись методами Рунге–Кутты и Дормана–Принса. Основное внимание уделено различным типам переходных процессов, стабилизирующихся и расходящихся, а также конфигурации границы области устойчивости в координатах параметров регулятора и величины скачка; как наиболее содержательные в статье приведены результаты для пропорционального параметра. Выявлено пять типов переходных процессов и несколько важных особенностей поведения системы вблизи границы области стабилизации. Так, нелинейная модель замкнутой системы оказалась неустойчивой к малым и устойчивой к бóльшим возмущениям в области неустойчивости своей линеаризации. Установившиеся колебания на границе устойчивости имеют меньшую амплитуду при увеличении размеров начального возмущения и др.

Ключевые слова: распределенная генерация, регулятор возбуждения, ПИДД$_2$-управление, переходные процессы, стабилизация, границы устойчивости.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61

Введение

Обеспечение устойчивости режимов генерирующих систем является одной из важнейших задач энергетики. Анализ статической устойчивости электрогенерации под действием малых возмущений обычно осуществляется отдельно от анализа динамической устойчивости переходных процессов под действием бóльших возмущений, возникающих в аварийных ситуациях. Если в первом случае достаточно найти степень устойчивости линеаризованной системы, то во втором необходимо изучать нелинейную модель.

В отличие от больших энергосистем в локальных системах распределенной генерации отключение и подключение любой нагрузки являются заметным возмущением. Отсюда ясна важность изучения систем распределенной генерации электроэнергии в режимах, близких к предельным, в частности развитие методов настройки многопараметрических регуляторов с максимально возможными показателями устойчивости [1].

Оптимизация настроек автоматического регулятора возбуждения (АРВ) допускает различные подходы. Классический метод Ляпунова был использован в [2] для обеспечения асимптотической устойчивости синхронной электрической машины. В линеаризованной системе управления нахождение оптимальных пара-

© 2020 А.В. Чехонадских

метров управления равносильно достижению максимальной степени устойчивости или, в общем случае, предельно возможного смещения полюсов системы влево на комплексной плоскости [3, 4].

Как удалось установить ранее [5], ресурсы ПИДД$_2$ АРВ позволяют достигать практически любой степени устойчивости линеаризованной системы за счет использования непомерно больших значений коэффициентов регулятора. Однако использование тех же настроек в исходной нелинейной модели приводит к умеренной скорости стабилизации переходных процессов. Дальнейшая фаза исследований заключалась в назначении некоторого практически целесообразного значения одного из параметров АРВ (пропорционального или интегрального) и оптимизации значений остальных с помощью критических корневых диаграмм [3, 4, 6]. Таким способом авторы находили субоптимальные настройки ПИДД$_2$ АРВ для линеаризованной системы с фиксированным интегральным или пропорциональным коэффициентом [5].

Попытка выяснить, как проявляет себя субоптимальность линеаризованной системы регулирования в протекании переходных процессов нелинейной модели с теми же настройками регулятора позволила обнаружить высокую робастность замкнутой системы в пространстве параметров управления. Иными словами, изменение настроек АРВ в широких пределах не оказывало видимого влияния на поведение контролируемых переменных и качество переходных процессов, например, на скорость снижения отклонения от установившегося режима или величину перерегулирования.

Но выяснение запаса устойчивости в пространстве параметров управления и величины начального возмущения столкнулось с трудностями в определении устойчивой зоны, перебоями (как представлялось поначалу) в характере протекания переходных процессов, неопределенностью времени расчета и сложностью конфигурации границы устойчивости.

Подобные вопросы привлекали внимание исследователей по различным причинам (в том числе в ситуациях, допускающих некоторые аналитические обобщения [7]), однако расчет границ устойчивости для различных значений параметров АРВ и величины возмущения составил неожиданно трудную задачу, решавшуюся с помощью серий численных экспериментов.

В статье представлены важные особенности переходных процессов нелинейной модели, которые следует иметь в виду при оценке устойчивости и определении границ области стабилизации для систем распределенной генерации электроэнергии.

1. Постановка задачи

Классическая теорема А.М. Ляпунова утверждает эквивалентность в малом асимптотической устойчивости (и неустойчивости) нелинейной динамической системы и ее линеаризации. Границы этой малости и характер переходных процессов за их пределами существенно зависят от влияния нелинейности, и моделирование поведения генератора с АРВ вблизи границы устойчивости оказывается трудоемкой проблемой в тех случаях, когда система управления подвергается возмущениям, которые нельзя считать малыми. То, что устойчивость системы отслеживается по углу передачи энергии, сложно связанным с напряжением на шинах и мощностью генератора, усугубляется косвенным регулированием через блок возбуждения. В этой связи вблизи границы устойчивости наблюдается несколько типов переходных процессов.

Главная задача заключалась в идентификации различных типов переходных процессов вблизи границы устойчивости по оси K_p; в числе прочего наше рассмотрение выявило зависимость этих типов от величины возмущения.

Моделью генератора послужила система известных нелинейных дифференциальных и функциональных уравнений [8], что позволило получить стационарный режим в относительных единицах ([5], они используются в докладе везде далее). ПИДД$_2$-регулирование осуществлялось как обратная связь через обмотку возбуждения. Поскольку возмущения в сети распределенной генерации вызваны подключениями и отключениями нагрузок и результирующими скачками или просадками напряжения на шинах, возмущение стационарного режима моделировалось изменениями импеданса линии. Дифференциальные уравнения решались в пакете Matlab тем из методов Рунге–Кутты или Дормана–Принса, который давал лучшие результаты; размер шага уменьшался до практической неразличимости решений.

Как наиболее содержательные, далее представлены результаты исследования окрестности границы устойчивости по пропорциональному параметру K_p, хотя изучались также границы для интегрального и дифференциальных параметров регулирования (в частности, для K_d схожие результаты менее выражены).

Заметим, что выписывавшиеся для поиска субоптимальных регуляторов характеристические многочлены линеаризованных систем (в том числе в [5]) не позволяют ни найти, ни проверить приводимые в работе результаты, так как линеаризация осуществлялась относительно установившихся режимов во внутренних точках области устойчивости вне связи с ее границей.

2. Предварительные определения

Как правило, для линеаризованной системы ситуация на границе устойчивости достаточно ясна. Вдоль оси некоторого параметра область асимптотической устойчивости и область колебаний с экспоненциально растущей амплитудой (или апериодическим экспоненциальным ростом контролируемых величин, например напряжения и мощности) разграничены единственной точкой, где возмущение приводит к незатухающим колебаниям ограниченной амплитуды. В этой точке уменьшение начального возмущения ведет к пропорциональному уменьшению отклонения переходного процесса от установившегося режима.

Для нелинейных систем ситуация сложнее. Численная оценка малости возмущения, гарантирующей эквивалентность, довольно затруднительна. Так как устойчивый для некоторых значений параметров АРВ генератор заведомо теряет синхронизацию при больших скачках напряжения на шинах, отклонения напряжения в пределах устойчивости (от максимальной просадки до максимального всплеска) будем называть *полосой стабилизируемых возмущений.* Естественная гипотеза состоит в сужении этой полосы по мере того как значение некоторого параметра приближается к граничной точке устойчивости по его оси.

Однако расчеты процессов в нелинейной системе дали другие результаты: из зоны заведомой неустойчивости сужающийся клин нестабилизируемых возмущений достигает слева граничной точки устойчивости линейной модели (рис. 5). Во всех примерах представлены три синхронных взаимосвязанных переходных процесса: верхний график показывает мощность, средний – угол передачи, нижний – напряжение на шинах; ось абсцисс представляет время в секундах.

Для более выраженного графического представления процессы на рис. 1 и 4 получены при значении параметра K_p = 50, значительно отличающегося от граничного значения K_p = 1; это связано с тем, что на границе тип переходного процесса может проявиться в результате слишком большого времени расчета; все качественные особенности графика отражены в полной мере.

Выше и ниже неустойчивого клина вблизи граничной точки обнаружены два типа устойчивости (рис. 1–2):

– асимптотическая устойчивость, при которой растущее время переходного процесса $t \to \infty$ вынуждает действующее значение $F(t)$ мощности, угла или напряжения стремиться к их значениям F_{st} в установившемся режиме, что возможно как при апериодическом процессе (рис. 1), так и при затухающих колебаниях:

$$\lim_{t\to\infty} F(t) = F_{st}$$

– некоторый аналог устойчивости по Ляпунову, когда растущее время приводит к стабилизации колебаний регулируемых величин относительно их значений в установившемся режиме (отличном от рабочего), где частота и амплитуда колебаний становятся практически постоянными, т. е. для некоторой периодической функции $P(t) = P(t + T)$ выполняется равенство (рис. 2):

$$\lim_{t\to\infty} |F(t) - P(t)| = 0 .$$

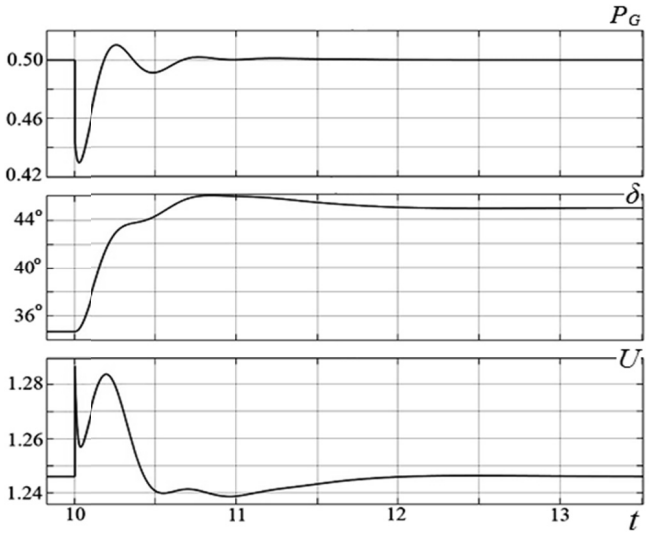


Рис. 1 – Асимптотически устойчивый переходный процесс; K_p = 50; скачок импеданса ΔZ от 2,5 до 2,596 о.е.

Fig. 1 – Asymptotically stable transient; K_p = 50; impedance surge ΔZ from 2,5 to 2,596 r.u.

Типов принципиально неустойчивых переходных процессов также два:

– колебания с неограниченно растущей амплитудой (флаттерный тип, рис. 3);

– неограниченный апериодический процесс, в котором управляемые переменные с некоторого момента монотонно изменяются (дивергентный тип).

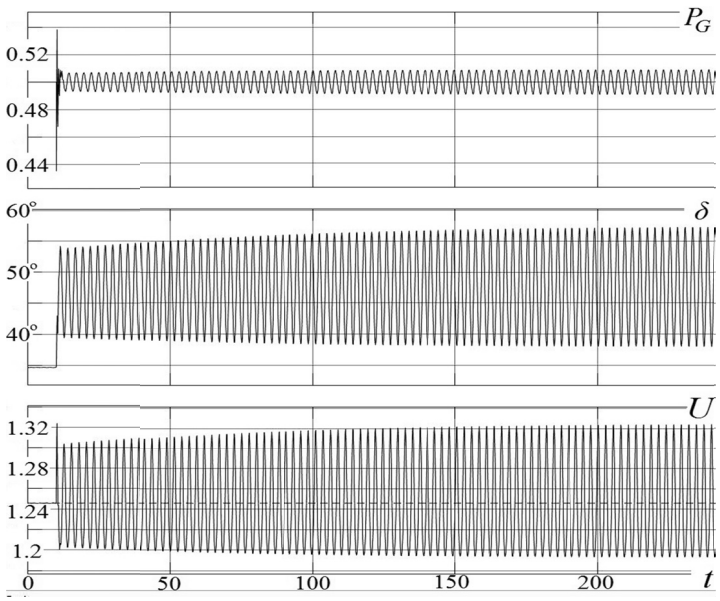


Рис. 2 – Устанавливающиеся колебания со стабилизирующейся амплитудой; $K_p = 1$

Fig. 2 – Steady-stating oscillations with stabilizing amplitude; $K_p = 1$

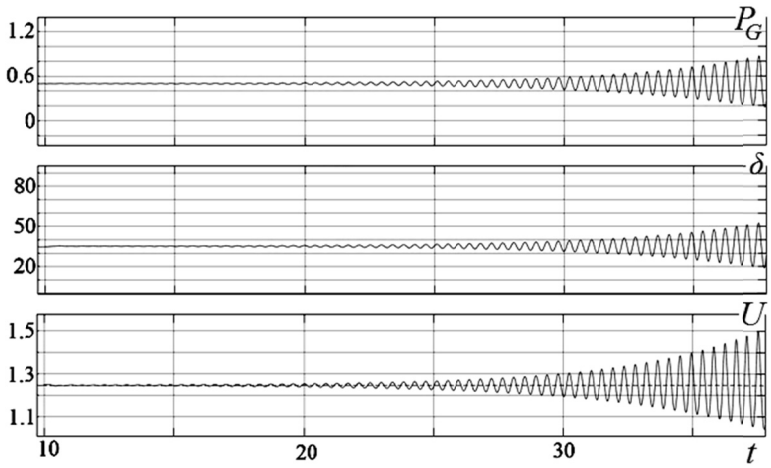


Рис. 3 – Нарастающие колебания (неограниченный флаттер); $K_p = 50$

Fig. 3 – Increasing fluctuations (unlimited flutter)); $K_p = 50$

В обоих случаях численное моделирование приводит к значениям угла передачи энергии, соответствующим потере генератором синхронности или аварийным значениям напряжения и мощности.

В некоторых случаях переходный процесс принимает форму иррегулярных флуктуаций относительно рабочих значений (рис. 4); этот тип переходных процессов не имеет прямых аналогов в линейных системах, однако в нелинейных системах встречается нередко [9].

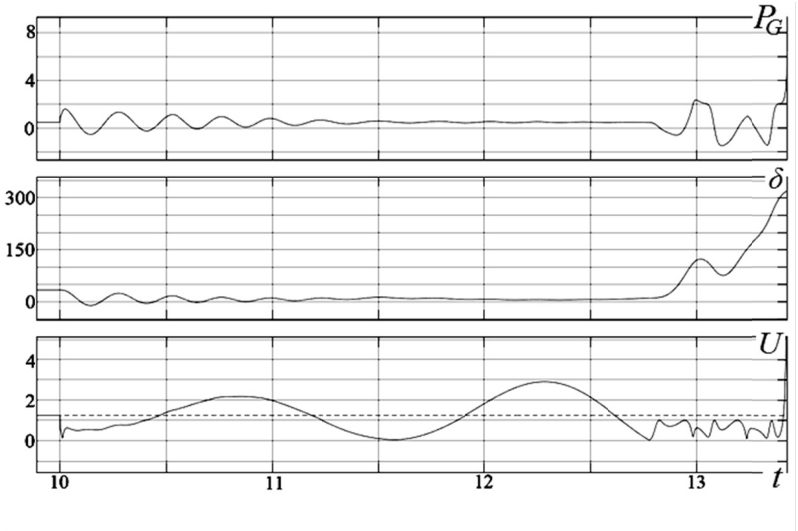


Рис. 4 – Апериодические нерегулярные флуктуации; $K_p = 1$, сброс импеданса Z с 2,5 до 2,21о.е.

Fig. 4 – Aperiodic irregular fluctuations; $K_p = 1$, impedance Z slump from 2,5 up to 2,21 r.u.

3. Результаты численных экспериментов

Для исследования устойчивости модели генератора с ПИДД$_2$ АРВ в пространстве параметров управления в [5] использовалось стандартное отклонение ΔZ импеданса нагрузки, а именно, отключение одной из двух параллельных линий, вызывавшее скачок напряжения на шинах 0,04 о.е. (3,3 %). Трудности численного определения границы области устойчивости вызываются большими расхождениями в ответах нелинейной системы и ее линеаризации на возмущения, которые нельзя считать малыми, поэтому впоследствии расчеты проводились при различной величине возмущающего скачка ΔZ.

Одно из них – стабилизация переходных процессов в области неустойчивости в малом. Второе – это два разных типа стабилизации: асимптотическая сходимость контролируемых переменных к установившимся значениям и формирование установившихся колебаний относительно рабочего режима. Внутренняя область на рис. 5 содержит пары (*параметр; возмущение*), для которых возникает один из этих устойчивых типов, тогда как внешняя область содержит пары с величинами переходных колебательных и апериодических процессов, неограниченно отклоняющимися от установившихся.

Следующая за нахождением границы задача заключалась в том, чтобы прояснить распределение типов переходных процессов в зависимости от значения параметра пропорционального управления K_p и начального значения возмущения напряжения (точнее, отклонения импеданса линии ΔZ, вызывающего это возмущение). Подробная «карта» распределения переходных процессов в окрестности точки (1; 2,5) показана на рис. 6.

Как известно, для линейной системы, находящейся на границе устойчивости, начальное возмущение вызывает незатухающие колебания относительно рабочего режима с ограниченной амплитудой; снижение начального возмущения приводит к снижению отклонения переходного процесса от рабочего. Проверка этого соотношения для нелинейной системы привела к результату, также отличающемуся от линейного случая.

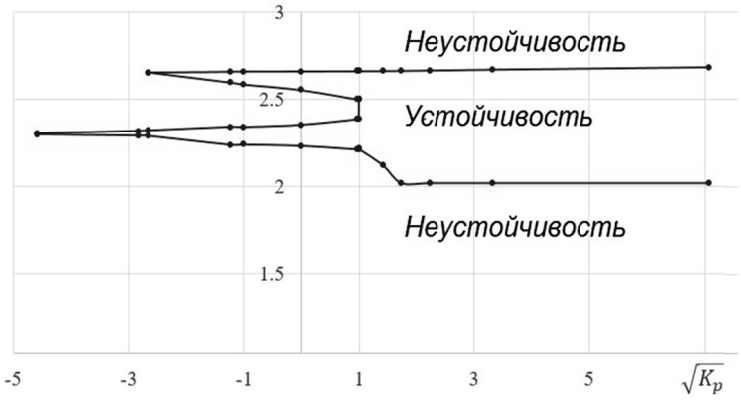


Рис. 5 – Область устойчивости нелинейной модели генератора при различных значениях пропорционального параметра; ось абсцисс градуирована как $\check{K} = \text{sign}\, K_p \cdot |K_p|^{1/2}$, по оси ординат отсчитываются значения ΔZ импеданса линии, отклоняющиеся от номинального значения 2,5 о.е.

Fig. 5 – The stability area of the nonlinear generator model at various values of the proportional parameter; the abscissa axis is graded as $\check{K} = \text{sign}\, K_p \cdot |K_p|^{1/2}$, the ordinate axis represents line impedance values ΔZ that deviate from the nominal value of 2,5 r.u.

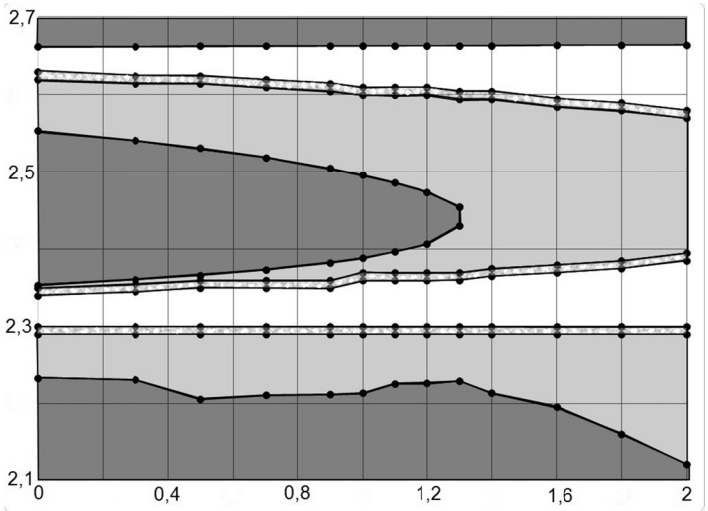


Рис. 6 – Распределение типов переходных процессов вблизи границы устойчивости при различных значениях коэффициента K_p (по оси абсцисс) и отклонений импеданса линии ΔZ (по оси ординат). Область асимптотической устойчивости белая, область установившихся колебаний выделена серым, неограниченно растущих переходных процессов – темно-серым; зоны неопределенности – крапчатые

Fig. 6 – Distribution of transient types near the stability boundary at different values of the coefficient K_p (along the abscissa axis) and deviations of the line impedance ΔZ (along the ordinate axis). The area of asymptotic stability is white, the area of steady oscillations is highlighted in gray, unlimited growing transient one – in dark gray; uncertainty zones are speckled

На отрезке значений импеданса, где переходный процесс приводит к установившимся колебаниям напряжения U_0 относительно его значения в установившемся режиме, зависимость между отклонением импеданса ΔZ и устанавливающейся амплитудой оказывается близка к линейной – но *убывающей*, т.е. противоположной той, которую предполагает устойчивость по Ляпунову (рис. 7). Однако в целом смена типа процессов объясняет уменьшение амплитуды установившихся колебаний при переходе из области колебаний с неограниченным ростом амплитуды в область асимптотической устойчивости с уменьшением амплитуды до нуля.

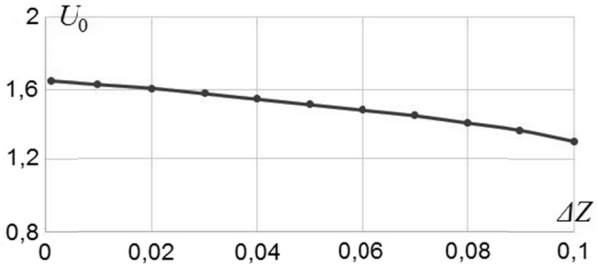


Рис. 7 – Связь отклонения импеданса ΔZ (по оси абсцисс) и установившейся амплитуды колебаний U_0 (по оси ординат) на границе устойчивости

Fig. 7 – Relationship between the deviation of impedance ΔZ (along the abscissa axis) and the steady-state oscillation amplitude U_0 (along the ordinate axis) at the stability boundary

4. Обсуждение результатов и заключение

Из численных расчетов процессов в принятой модели видна сложность поведения регулируемого генератора вблизи окрестности границы устойчивости по параметру K_p.

Как видно из рис. 5–6, верхняя граница области общей устойчивости, содержащей оба типа ограниченных переходных процессов, слабо зависит от значения параметра K_p. Конфигурация нижней границы области общей устойчивости при снижении импеданса нельнейная. И хотя граница общей устойчивости по импедансу начинает меняться только в окрестности точки $K_p = 1$, справа от окрестности этой точки граница общей устойчивости также практически постоянна (рис. 5).

«Топография» на рис. 6 показывает, что область устанавливающихся колебаний является своеобразным «чехлом» на «острие» суживающейся полосы неустойчивости, который врезается в область общей устойчивости слева. Причина таких устанавливающихся колебаний не связано с наличием у линеаризованной системы чисто мнимых полюсов. Проявления подобного эффекта у реальной электромеханической системы следует отнести к самораскачиванию генератора [10].

Рассматривая результаты исследования в целом, выделим четыре значимых фактора:

– парадоксальное поведение нелинейной системы управления вне области устойчивости (т. е. при $K_p < 1$) линеаризованной системы: асимптотическая устойчивость для *достаточно малых* возмущений теряется, но асимптотическая устойчивость по отношению к *не слишком малым* возмущениям все еще сохраня-

ется: это острые шипы на рис. 5 и узкие белые полосы на рис. 6; таким образом, можно предположить отрицательную обратную связь, оказываемую самим взаимодействием напряжения, мощности и угла передачи в модели генератора *помимо* АРВ;

– различие в границах между областями асимптотической устойчивости и неограниченной неустойчивости по отношению к скачкам напряжения вверх и вниз: зоны стабилизируемых и нестабилизируемых всплесков разделены четкой границей, тогда как аналогичная граница для просадок оказывается достаточно широкой полосой (нижняя серая полоса на рис. 6);

– переход от колебаний с установившейся ненулевой амплитудой к затухающим колебаниям (т. е. с нулевым пределом амплитуды) происходит на небольшом отрезке оси параметра K_p; вопрос о непрерывности этого перехода, аналогичен вопросу о ширине резонансной зоны в физических и механических системах;

– в промежуточных полосах (рис. 6) сохраняется неопределенность между двумя типами переходных процессов; решающее значение здесь приобретают ошибки вычислений, так как выявление типа процесса требует слишком большого времени расчета.

В заключение подчеркнем, что без сравнения с результатами исследования электромеханического агрегата реального или его аналоговой модели трудно оценить адекватность численного моделирования вблизи границы устойчивости.

Автор считает приятным долгом поблагодарить коллег: доцента Д.В. Армеева, сыгравшего важную роль в определении направленности нашей работы и руководившего созданием нелинейной модели генератора, и магистранта НГТУ Г.Б. Нестеренко, выполнившего весь объем численных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smart grids: ABB Review. – Zürich: ABB Group R&D and Technology, 2010. – 84 p.
2. **Polyak B.T., Shcherbakov P.S.** Lyapunov functions: an optimization theory perspective // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, iss. 1. – P. 7456–7461. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1513.
3. **Корюкин А.Н., Чехонадских А.В.** Предел устойчивости трехмассовой системы с регулятором 3-го порядка. Ч. 1 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 4 (66). – С. 3–22.
4. **Корюкин А.Н., Чехонадских А.В.** Предел устойчивости трехмассовой системы с регулятором 3-го порядка. Ч. 2 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 37–56.
5. **Армеев Д.В., Чехонадских А.В., Нестеренко Г.Б.** Ресурсы стабилизации напряжения синхронного генератора АРВ сильного действия // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 1. – С. 24–32. – DOI: 10.17588/2072-2672.2017.1.024-032.
6. **Воевода А.А., Чехонадских А.В.** Построение списка критических расположений полюсов систем автоматического управления // Доклады АН ВШ РФ. – 2014. – № 2–3 (23–24). – С. 7–18.
7. **Юмагулов М.Г., Мустафина И.Ж., Ибрагимова Л.С.** Исследование границ областей устойчивости двухпараметрических динамических систем // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 10. – С. 74–89.
8. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
9. **Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Nosek J.** Automatic control system: numerical modeling and optimization. – Moscow: RuScience, 2020. – 228 p. – ISBN 978-5-4365-5961-2.
10. Переходные процессы в электроэнергетических системах / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. – М.: МЭИ, 2019. – 416 с. – ISBN 978-5-7046-1937-6.

STABILITY AREA OF A SYNCHRONOUS GENERATOR NONLINEAR MODEL WITH MULTIPARAMETRIC EXCITATION CONTROLLER

Chekhonadskikh A.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

We take as the research object the well-known system of nonlinear differential and functional equations that describes a synchronous generator. PIDD2-control was carried out through the excitation block. Effective values of the steady state in relative units and the preliminary settings of suboptimal controllers were obtained earlier using a linearized model. Disturbing surges (spikes and slump) in bus voltages were modeled as line impedance changes. The system stabilization was studied at various surges values and controller parameters by means series of numerical experiments; the calculations were carried out by the methods of Runge-Kutta and Dorman-Prince. The main attention was paid to various transient types, both stabilizing and diverging, as well as a configuration of the stability region boundary in the controller parameters of and a surge magnitude; the paper presents the results for the proportional control parameter are as the most informative. We've identified five types of transients and several important features of the model's behavior near the stabilization area boundary. Thus, the nonlinear model turned out to be unstable to small and stable to bigger perturbations in the unstable area of its linearization. The steady-state oscillations at the boundary have a lower amplitude with increasing of an initial perturbation, etc.

Keywords: distributed generation, synchronous generator, excitation controller, PIDD2-control, transients, stabilization, stability boundary.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61

REFERENCES

1. *Smart grids: ABB Review*. Zürich, ABB Group R&D and Technology, 2010. 84 p.
2. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. Lyapunov functions: an optimization theory perspective. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, iss. 1, pp. 7456–7461. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1513.
3. Koryukin A.N., Chekhonadskih A.V. Predel ustoichivosti trekhmassovoi sistemy s regulyatorom 3-go poryadka. Ch. 1 [Stability limit of the triple mass system with 3rd order controller. Pt. 1]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 4 (66), pp. 3–22.
4. Koryukin A.N., Chekhonadskih A.V. Predel ustoichivosti trekhmassovoi sistemy s regulyatorom 3-go poryadka. Ch. 2 [Stability limits of three-mass system with a 3^{d} order controller, Pt. 2]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 37–56.
5. Armeyev D.V., Chekhonadskikh A.V., Nesterenko G.B. Resursy stabilizatsii napryazheniya sinkhronnogo generatora ARV sil'nogo deistviya [Resources of voltage stabilization of a synchronous generator by a multiparametric excitation controller]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2017, no. 1, pp. 24–32. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.1.024-032.
6. Voevoda A.A., Chekhonadskikh A.V. Postroenie spiska kriticheskikh raspolozhenii poliusov sistem avtomaticheskogo upravleniia [Construction of the critical location list of automatic control system poles]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 2–3 (23–24), pp. 7–18.
7. Yumagulov M.G., Mustafina I.Z., A study of the boundaries of stability regions in two-parameter dynamical systems. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 10, pp. 1790–1802. DOI: 10.1134/S0005117917100046. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 10, pp. 74–89.
8. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.

9. Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Nosek J. *Automatic control system: numerical modeling and optimization.* Moscow, RuScience, 2020. 228 p. ISBN 978-5-4365-5961-2.
10. Kryuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Yu.P., Piratorov M.V. *Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Transients in electric power systems]. Moscow, MEI Publ., 2019. 416 p. ISBN 978-5-7046-1937-6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Чехонадских Александр Васильевич – родился в 1959 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры АМЛ НГТУ. Область научных интересов: прикладная алгебра, теория автоматического управления,теория графов. Опубликовано свыше 90 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20/8. E-mail: chekhonadskikh@corp.nstu.ru).

Chekhonadskikh Alexander Vasil'evich (b. 1959) – Doctor of Sciences (Eng.), professor of Algebra and logics department, NSTU. His research interests lie in applied algebra, control theory and graph theory. He is author of 90 scientific papers. (Address: 20/8, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: chekhonadskikh@corp.nstu.ru).

Статья поступила 10 октября 2020 г.
Received October 10, 2020

To Reference:

Chekhonadskikh A.V. Oblast' stabilizatsii nelineinoi modeli sinkhronnogo generatora s PIDD2-regulyatorom vozbuzhdeniya [Stability area of a synchronous generator nonlinear model with multiparametric excitation controller]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 51–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 4 (49) октябрь–декабрь 2020

Выпускающий редактор *И.П. Бровановa*
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 18.01.2021. Выход в свет 20.01.2021. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 5,6. Печ. л. 4,0. Изд. № 35. Заказ № 331. Цена свободная

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

16+

Индекс журнала в Роспечати
82961