НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2019 апрель–июнь № 2 (43)

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.К. Макуха, д-р техн. наук, проф.
В.Ю. Нейман, 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: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 4, ком. 415, телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2019 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

2019 | April – June | № 2 (43)

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.K. Makukha, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, 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 Address: Office 415, 20 bld. 4, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science, 2019

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2019 апрель-июнь № 2 (43)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Коскин А.П., Попов С.А., Щербашина А.В.
Разработка составов и исследование теплопроводящих свойств наносуспензий с содержанием оксида цинка 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Калужский Д.Л., Мехтиев А.Д., Харитонов А.С., Уваров Н.А.
Адаптивная система управления генератором с комбинированным возбуждением в ветроэнергетике.....16

Козлов И.Н., Вострецов А.Г.
О возможности использования спутниковых навигационных систем в качестве сигналов подсвета в пассивных радиолокационных станциях 27

Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Мухина М.А.
Изучение характеристик пламени горелочного устройства при распылении жидких углеводородов паровой струей.....38

Нейман Л.А., Нейман В.Ю.
Обобщенная динамическая модель однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия.....56

Резников Б.С., Шеремет О.В.
Влияние внутренней структуры композита
на границы допустимых значений
температурного воздействия.....72

Шевченко А.А., Темлякова З.С., Топорков Д.М.
Автоматизация расчета нагревов двигателя
с применением устройства плавного пуска
на базе алгоритма расчета самозапуска 80

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER EDUCATION
ACADEMY OF SCIENCES

2019 April–June № 2 (43)

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Koskin A.P., Popov S.A., Shcherbashina A.V.
The composition development and the heat transfer investigation
of zinc oxide nanofluids 7

TECHNICAL SCIENCES

Kaluzhskii D.L., Mekhtiyev A.D., Kharitonov A.S., Uvarov N.A.
Adaptive control system of a generator
with a combined excitation in wind power 16

Kozlov I.N., Vostretsov A.G.
About the possibility of using satellite navigation systems
as illumination signals in passive radar stations.....27

Kopyev E.P., Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Loboda E.L.,Agafontsev M.V., Mukhina M.A.
Study of flame characteristics of burner when spraying liquid
hydrocarbons with a steam jet.....38

Neyman L.A., Neyman V.Yu.
Generalized model of a single-coil synchronous
impact electromagnetic machine.....56

Reznikov B.S., Sheremet O.V.
The influence of the internal structure of the composite
at the boundaries of the limit values of the temperatures.....72

Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Toporkov D.M.
Motor heating calculation automatization using the soft-starting
device based on the self-starting calculation algorithm 80

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2019 апрель–июнь № 2 (43)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 661.847.22:536.223

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ НАНОСУСПЕНЗИЙ С СОДЕРЖАНИЕМ ОКСИДА ЦИНКА

А.П. Коскин[1], С.А. Попов[2], А.В. Щербашина[1,3]
[1]*Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН*
[2]*ООО «Новые технологические решения»*
[3]*Новосибирский государственный технический университет*

Теплопроводность ряда жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью может быть существенно увеличена при введении в них наночастиц, при условии получения устойчивых наносуспензий. В ходе работы подобран состав базовой теплоотводящей жидкости с содержанием тетраэтиленгликоля (ПЭГ200) и коммерчески доступного керосина (КО25). Разработаны методы синтеза устойчивых наноразмерных золей 0,5–3 вес. % ZnO/ПЭГ200-КО25 с использованием олеата цинка в качестве диспергатора. Подготовлена экспериментальная установка для тестирования теплоотводящих свойств жидкостей (в том числе наносуспензий). Показано, что в автоконвекционном режиме теплоотводящие свойства синтезированных наносуспензий превышают коммерчески-доступные образцы полиметилсилоксановых жидкостей.

Ключевые слова: наночастицы оксида цинка, теплопроводность, теплоотведение, наносуспензии, передача тепла.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-7-15

Введение

Для охлаждения перегреваемых частей электрооборудования оптимально использование жидкостных теплоносителей [1]. С точки зрения эффективности теплоотведения лучше те жидкости, что хорошо проводят тепло, сохраняя при этом остальные требуемые свойства, такие как низкая электропроводность, работоспособность в широком интервале температур и термическая устойчивость. В этом качестве чаще всего используют полиметилсилоксановые жидкости. Они обладают хорошими диэлектрическими свойствами (PMS-X, где X – вязкость жидкости).

Теплопроводность ряда жидкостей может быть существенно увеличена при введении в них коллоидных наночастиц («nanofluids»). В частности, высокая теплопроводность зафиксирована для коллоидов с содержанием углеродных нанотрубок, нанодисперсных алмазов, а также ряда наночастиц металлов и металлоксидов [2–13]. Процессы теплопередачи в системах данного типа активно исследовались в ряде работ как экспериментально, так и теоретически. Разработаны методы синтеза ряда коллоидов, отличающихся типом наночастиц и составом базовой жидкости. Исследованы процессы теплопередачи таких коллоидов в автоконвекционном режиме и в режиме с принудительным оборотом теплоносителя. Улучшенная теплопроводность коллоидов является основой для инноваций в области интенсификации теплообмена, что имеет большое значение для ряда промышленных процессов и задач микроэлектроники.

В качестве базовой теплоотводящей жидкости, в которой диспергируются наночастицы, может быть использован этиленгликоль (ЭГ). ЭГ хорошо удерживает

Работа выполнена в рамках государственного задания ИК СО РАН (Проект № АААА-А17-117041710086-6)

© 2019 А.П. Коскин, С.А. Попов, А.В. Щербашина

частицы во взвешенном состоянии и обладает высокой теплопроводностью, однако его гигроскопичность значительно ухудшает диэлектрические свойства. Альтернативой ЭГ выступают низкомолекулярные полиэтиленгликоли (ПЭГ; до 400 г/моль), обладающие малой вязкостью (вязкость ЭГ при 25 °С − 16.2 сР, ПЭГ200 − 60 сР), что принципиально для большинства приложений с использованием теплоносителей.

Целью настоящей работы является разработка составов и методов синтеза наночастиц для композиций типа ZnO/ПЭГ200-керосин, а также исследование их теплопроводящих свойств в автоконвекционном режиме. Использование ZnO для модифицирования базовой жидкости (состав ПЭГ200-керосин) обусловлено его низкой токсичностью, дешевизной производства и высокой теплопроводностью. В предложенной нами композиции ПЭГ200 как повышает теплопроводность смеси за счет увеличения теплопроводности базовой жидкости, так и способствует удерживанию наночастиц ZnO во взвешенном состоянии. Добавка керосина, который использовался в качестве модельного насыщенного углеводорода, в свою очередь, снижает вязкость жидкости. Отметим, что ПЭГ200 и насыщенные углеводороды взаимно растворимы, в отличие от ЭГ и пропиленгликоля.

1. Экспериментальная часть

Стандартный метод синтеза наночастиц оксида цинка заключался в осаждении водных растворов солей предшественников ZnX $\left(\text{где } X = SO_4^{2-},\ Cl^-,\ NO_3^-,\ AcO^-\right)$ карбонатом аммония $\left((NH_4)_2CO_3\right)$ до pH ~8 с получением золя гидроксид-карбоната цинка $\left(Zn_5(OH)_6(CO3)_2\right)$ [14–17]. Полученный золь отделяли центрифугированием, промывали и прокаливали при температурах 300–400 °С с образованием фазы ZnO (метод А), либо получали оксид цинка непосредственно в водной суспензии, повышая основность среды до pH ~9–10 (обработка раствором NaOH; метод Б). Полученный по методу Б оксид цинка центрифугировали и сушили при температуре 90 °С.

$$5Zn^{2+} + 5CO_3^{2-} + 3H_2O \rightarrow Zn_5(OH)_6(CO_3)_2 + 3CO_2,$$

$$Zn_5(OH)_6(CO3)_2 \rightarrow 5ZnO + 3H_2O + 2CO_2 \text{ (прокаливание).}$$

Полученные образцы подвергали механической активации (планетарная мельница Активатор-2SL). Далее, сухой оксид цинка экстрагировали (2 ч, 60 °С) базовой жидкостью (смеси состава керосин (КО25) и тетраэтиленгликоль (м.в. – 200 г/моль; ПЭГ200)) в присутствии олеата цинка (до 5 вес. %) (ZnO-nf; рис.1). Также тестировался метод модификации золя ZnO олеиновой кислотой непосредственно в маточном растворе без выделения сухого оксида. Для этого осаждение ZnO вели непосредственно в присутствии олеиновой кислоты (до 5 вес. %). Полученный гидрофобный осадок отфильтровывали, промывали этиловым спиртом и диспергировали в базовой жидкости (ZnO-oa; рис. 1). Все полученные суспензии выстаивали в течение 24 часов отделяя выпавший осадок, анализировали содержание взвешенного оксида и исследовали теплопроводящие свойства. Последующее выстаивание наносуспензий (до 3 недель) не приводило к осаждению дополнительных количеств оксида. Для изучении влияния концентрации наночастиц на теплопроводящие свойства наносупензий образец с содержанием 3 вес. % ZnO разбавляли чистой базовой жидкостью. Вязкость жидкостей измеряли ротационным вискозиметром Брукфильда (DV2TLV). Также получен-

ные образцы охарактеризовывались методом динамического рассеяния света (ДРС, Photocor compact) для определения гидродинамического радиуса диспергированных наночастиц. Для исследования морфологии наночастиц в полученных образцах использовалась электронная микроскопия (JEM-2010). Фазовый состав полученных оксидов регистрировался с использованием метода дифракции рентгеновских лучей (DRON-3M).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Приготовление наносуспензий с содержанием оксида цинка

Общая схема протестированных в представленной работе методов синтеза наночастиц ZnO и наносуспензий с их содержанием приведена на рис. 1.

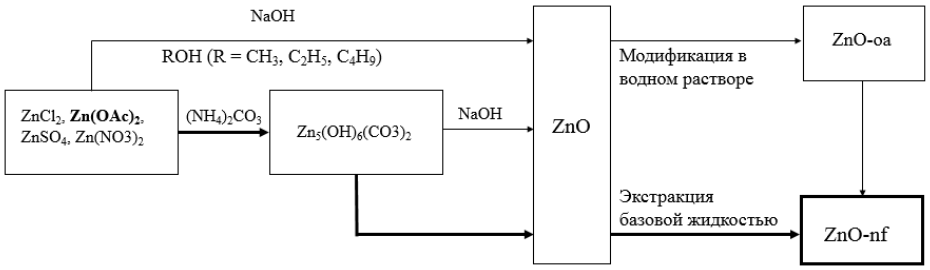


Рис. 1 – Схема синтеза наносуспензий с содержанием оксида цинка

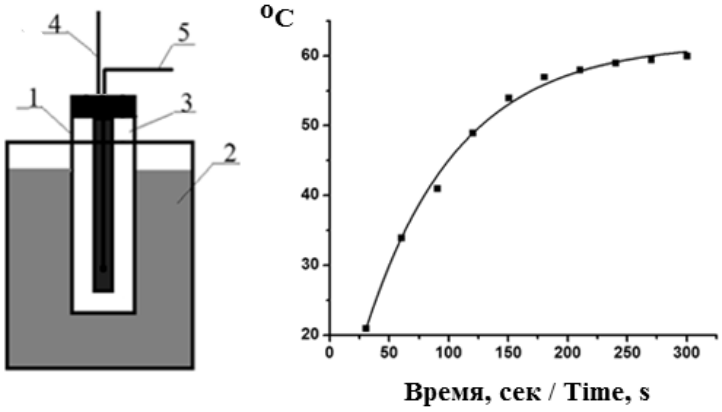
Fig. 1 – The scheme of zinc oxide containing nanofluids synthesis

В результате проведенных экспериментов была подобрана оптимальная методика синтеза наносуспензий оксида цинка (ZnO-nf, размер частиц 20–50 нм), которая заключалась в последовательных стадиях синтеза гидроксид-карбоната цинка, последующего прокаливания при температуре 300 ^{o}C, механической активации и экстракции базовой жидкостью. Последующее выстаивание (24 часа, 20 °C) полученных наносуспензий приводило к осаждению фракции крупных частиц (~>50 нм), а также не модифицированных олеатом частиц и образованию устойчивых к седиментации образцов (до 3 вес. % ZnO). Предварительно с помощью данных термогравиметрии (ток аргона, 20–500 °C, 10 °C/мин) было показано, что разложение $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ начинается в диапазоне температур 280–300 °C. Таким образом, с целью снизить спекание частиц наиболее целесообразно прокаливать предшественник оксида цинка при температурах, не превышающих 300 °C. С использованием электронной микроскопии было обнаружено, что при осаждении $ZnCl_2$, $ZnSO_4$ и $Zn(NO_3)_2$ карбонатом аммония, с последующим прокаливанием, происходит образование наночастиц ZnO преимущественно в форме «стержней» и «цветков». Ранее было показано, что для синтеза устойчивых наносуспензий в гидрофобных растворителях оптимально использование сферических наночастиц оксида [9]. Это предположительно связано с наименьшей площадью гидрофильной поверхности частиц. Другим необходимым условием получения устойчивых к седиментации наносуспензий является синтез частиц оксида цинка с размерами, не превышающими 80–100 нм. При синтезе ZnO в спиртовых растворах (осаждение предшественников оксида щелочами в метаноле, этаноле или изопропаноле) образовывались наночастицы с наименьшими размерами (до 10–30 нм), однако данная методика требует большого расхода органических

растворителей [18]. Кроме того, при использовании данного метода не удалось подобрать способ модификации поверхности частиц оксида без выделения золя из спиртовой суспензии. Выделение золя из спиртовой суспензии приводило к существенной агломерации наночастиц. Также при выделении из суспензии оксида цинка, полученного по методу Б (осаждение карбонатом, с последующей обработкой щелочью) и модификацией олеиновой кислотой получить устойчивые наносуспензии не удалось. Это предположительно связано с быстрой пептизацией и укрупнением оксида цинка в воднощелочных растворах, что хорошо согласуется с данными работы [18]. По этой же причине для синтеза наносуспензий предпочтителен метод экстракции (согласно данным ДРС размер частиц ZnO-nf < ZnO-oa, рис. 1).

2.2. Исследование теплопроводящих свойств наносуспензий с содержанием оксида цинка

Для тестирования теплопроводящих свойств жидкостей, в том числе наносуспензий, была подготовлена экспериментальная установка (рис. 2, *а*). Эксперимент моделирует процесс отведения тепла от разогреваемых элементов в автоконвекционном режиме. Установка состояла из латунной кюветы (*1*, 7 мл) погруженной в термостатируемую среду (*2*, 20 °C). Внутрь емкости вносили испытуемую жидкость (*3*, 5 мл) и погружали не соприкасающийся со стенками емкости и снабженный термопарой (5) нагревательный элемент (*4*). Перед проведением эксперимента жидкости дегазировались (продувание гелия), с целью снизить вклад растворенного газа в наблюдаемую теплопроводность.



а *б*

Рис. 2 – Исследование теплопроводящих свойств жидкостей:
а – схема экспериментальной установки; *б* – определение равновесной температуры для типичного эксперимента

Fig. 2 – Investigation of the nanofluids thermal conductivity:
a – scheme of the experimental setup; *b* – determination of an equilibrium temperature for a typical experiment

Благодаря высокой теплопроводности стенок кюветы на термопаре устанавливалась равновесная температура ($T_{равн}$; характеристическое время ≈5 мин), обусловленная нагреванием элемента и отдачей тепла в термостатируемую среду через слой испытуемой жидкости (рис. 2, *б*) или с конвекционным потоком.

Таким образом, равновесная температура характеризует наблюдаемую теплопроводность наносуспензии, которая определяется теплопроводностью жидкости и ее вязкостью. Более низкая равновесная температура соответствует более эффективной теплопередаче.

В предварительных исследованиях был подобран состав бинарной базовой жидкости (рис. 2, табл. 1). В качестве ее компонентов использовались тетраэтиленгликоль и коммерчески-доступный керосин. КО25 использовался в качестве модельного насыщенного углеводорода и, схожие закономерности регистрировались в случае низковязких парафинов. Добавление керосина (1,7 сП) существенно снижало динамическую вязкость ПЭГ (с 60 сП, до 2–4 сП). Оптимальным, с точки зрения наблюдаемой теплопроводности, оказался состав с содержанием 0,68 объемных долей КО25. Данный состав композиции базовой жидкости сочетает в себе низкую вязкость, обусловленную содержанием насыщенных углеводородов и высокую теоретическую теплопроводность, которая характерна для гликолей.

Таблица 1 / Table 1

Теплопроводящие свойства базовых жидкостей
Heat-transfer properties of base fluids

№	Базовая жидкость	Объемная доля КО25	$T_{равн}$, °C
1	ПЭГ200	0	67,3
2	КО25/ПЭГ200	0,20	61,9
3	КО25/ПЭГ200	0,36	57,5
4	КО25/ПЭГ200	0,68	55,4
5	КО25/ПЭГ200	1,00	63,7

Для подобранного состава базовой жидкости (0,68 об. долей КО25/ПЭГ200) исследовалось влияние содержание наночастиц оксида цинка на наблюдаемую теплопроводность. В результате проведенного эксперимента было показано, что повышение содержания наночастиц ZnO свыше 1 % приводит к повышению равновесной температуры и соответственно к снижению наблюдаемой теплопроводности. Это предположительно связано с повышением вязкости наносуспензий в случае высоких концентрацией наночастиц ZnO (табл. 2). Кроме того, при увеличении концентрации ZnO в базовой жидкости согласно данным метода ДРС наблюдается увеличение среднего размера частиц (30–40 нм – 0,5 %, 40–50 нм – 3 %), что предположительно приводит к ухудшению теплопроводящих свойств. Тестирование наблюдаемой теплопроводности полученных наносуспензий позволило подобрать оптимальную концентрацию вводимых наночастиц (~1 %).

Таблица 2 / Table 2

Теплопроводящие свойства нанодисперсий с содержанием оксида цинка
Heat-transfer properties of zinc oxide containing nanofluids

№	Концентрация nano-ZnO (вес.%)	Базовая жидкость (об. доля КО25)	Вязкость, сР	$T_{равн}$, °C
1	–	PMS-20	20	62,3
2	0,5 ± 0,03	КО25/ПЭГ200 (0,68)	1,9	51,1
3	1 ± 0,03	КО25/ПЭГ200 (0,68)	2,5	49,7
4	2 ± 0,03	КО25/ПЭГ200 (0,68)	3,8	52,3
5	3 ± 0,02	КО25/ПЭГ200 (0,68)	5,0	52,5

Заключение

В результате работы оптимизирован метод синтеза наночастиц оксида цинка и их метод последующего диспергирования с образованием устойчивых к седиментации наносуспензий (0,5–3 вес. % ZnO/ПЭГ200-КО25). Подготовлена экспериментальная установка для тестирования теплоотводящих свойств жидкостей (в том числе наносуспензий). Подобран оптимальный состав базовой теплоотводящей жидкости и содержание наночастиц ZnO. Показано, что в автоконвекционном режиме теплоотводящие свойства синтезированных наносуспензий ($T_{равн}$ = = 49,7–52,5 °C) превышают коммерчески-доступную жидкость (PMS-20; $T_{равн}$ = = 62,3 °C).

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of heat transfer in nanofluids: conductive, convective and radiative experimental results / M. Lomascolo, G. Colangelo, M. Milanese, A. de Risi // Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 43. – P. 1182–1198. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.086.
2. **Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A.** A review on applications and challenges of nanofluids // Renewable Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15, N 3. – P. 1646–1668. – DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.
3. **Huminic G., Huminic A.** Application of nanofluids in heat exchangers: a review // Renewable Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16, N 8. – P. 5625–5638. – DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.023.
4. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review / G. Paul, M. Chopkar, I. Manna, P.K. Das // Renewable Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14, N 7. – P. 1913–1924. – DOI: 10.1016/j.rser.2010.03.017.
5. **Sarkar J.** A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids // Renewable Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15, N 6. – P. 3271–3277. – DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.025.
6. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultrafine particles (dispersion of c-Al_2O_3, SiO_2, and TiO_2 ultrafine particles) / H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma // Netsu Bussei. – 1993. – Vol. 7, N 4. – P. 227–233. – DOI: 10.2963/jjtp.7.227.
7. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles / S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman // The Journal of Heat Transfer. – 1999. – Vol. 121, N 2. – P. 280–289. – DOI: 10.1115/1.2825978.
8. **Wang X., Xu X., Choi S.U.S.** Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture // The Journal of Thermophysics Heat Transfer. – 1999. – Vol. 13, N 4. – P. 474–480. – DOI: 10.2514/2.6486.
9. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles / H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu // The Japanese Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 91, N 7. – P. 4568–4572. – DOI: 10.1063/1.1454184.
10. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids / S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel // ASME The Journal of Heat Transfer. – 2003. – Vol. 125, N 4. – P. 567–574. – DOI: 10.1063/1.1454184.
11. **Wen D., Ding Y.** Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ-alumina nanofluids // The Journal of Nanoparticle Research. – 2005. – Vol. 7, N 2–3. – P. 265–274. – DOI: 10.1007/s11051-005-3478-9.
12. **Li C.H., Peterson G.P.** Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids) // The Japanese Journal of Applied Physics. – 2006. – Vol. 84, N 1. – P. 1–8. – DOI: 10.1205/cherd.04253.
13. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of Al_2O_3 nanofluids / V. Barbes, R. Paramo, E. Blanco, M.J. Pastoriza-Gallego, M.M. Pineiro, J.L. Legido,

C. Casanova // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2013. – Vol. 111, N 2. – P. 1615–1625. – DOI: 10.1007/s10973-012-2534-9.
14. Synthesis and surface modification of ZnO nanoparticles / H. Ruoyu, P. Tingting, Q. Jianzhong, L. Hongzhong // Chemical Engineering Journal. – 2006. – Vol. 119, N 2. – P. 71–81. – DOI: 10.1016/j.cej.2006.03.003.
15. Size-controllable synthesis of spherical ZnO nanoparticles: size- and concentration-dependent resonant light scattering / Y. Jun, Zh Ronghui., Zh. Chengbin, S. Qun, L. Yi, L. Chongying, H. Xiandeng // Microchemical Journal. – 2012. – Vol. 100. – P. 61–65. – DOI: 10.1016/j.microc.2011.09.002.
16. Synthesis of ZnO nanoparticles by thermal decomposition of basic zinc carbonate / Hutera B., Kmita A., Olejnik E., Tokarski T. // Journal of Archives of Metallurgy and Materials. – 2013. – Vol. 58, N 2. – P. 489–491. – DOI: 10.2478/amm-2013–0023.
17. **Zhang S.Z., Li X.G.** Preparation of ZnO particles by precipitation transformation method and its inherent formation mechanisms // Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochem. – 2003. – Vol. 226. – P. 35–44. – DOI: 10.1016/S0927-7757(03)00383-2.
18. **Meulenkamp E.A.** Synthesis and growth of ZnO nanoparticles // The Journal of Physical Chemistry. – 1998. – Vol. 102, N 29. – P. 5566–5572. – DOI: 10.1021/jp980730h.

THE COMPOSITION DEVELOPMENT AND THE HEAT TRANSFER INVESTIGATION OF ZINC OXIDE NANOFLUIDS

Koskin A.P.[1], Popov S.A.[2], Shcherbashina A.V.[1,3]
[1]*Borescov Institute of Catalysis, Novosibirsk, Russia*
[2] "*New technological solutions*" *Ltd, Berdsk, Russia*
[3]*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Many industrial processes involve heat removal by means of cooling devices. In particular, the problem of the temperature control has become crucial in high heat fluxes applications, such as nuclear fission plants and systems for micro/nano power electronics (MEMS/NEMS). Nanofluids represent diluted suspensions of nanoparticles with a diameter of less than 100 nm. The present study is devoted to the liquid composition consists of zinc oxide nanoparticles (ZNP) in tetraethylene glycol (PEG200)/kerosene (KO25) base fluid. Zinc oxide nanoparticles samples were obtained by sol-gel technique using ZnX (II) $\left(\text{where } SO_4^{2-}, NO_3^-, AcO^-\right)$ as precursor, followed by calcination of $Zn(CO_3)_y(OH)_x$ at 300–400 °C. Preparation methods of 0.5–3 wt.% ZnO/10–40 vol.% PEG200-KO25 nanofluids have been developed using zinc oleate (1–3 wt.%) as a dispersant. The observed thermal conductivity were measured using self-constructed experimental setup. An equilibrium temperature (T_{eq}) established as a result of heat transfer to a medium and constant heating process. That parameter used to describe observed thermal conductivity. The lower viscosity of the prepared nanofluids leads to a greater observable thermal conductivity at auto-convection mode (T_{eq} = 49.7–52.5 and 62.1 °C for PMS-20).

Keywords: zinc oxide nanoparticles, thermal conductivity; nanofluids, heat transfer.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-7-15

REFERENCES

1. Lomascolo M., Colangelo G., Milanese M., Risi A. de. Review of heat transfer in nanofluids: conductive, convective and radiative experimental results. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 43, pp. 1182–1198. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.086.
2. Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 1646–1668. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.
3. Huminic G., Huminic A. Application of nanofluids in heat exchangers: a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no. 8, pp. 5625–5638. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.023.

4. Paul G., Chopkar M., Manna I., Das P.K. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2010. vol. 14, no. 7, pp. 1913–1924. DOI: 0.1016/j.rser.2010.03.017.
5. Sarkar J. A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 6, pp. 3271–3277. DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.025.
6. Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultrafine particles (dispersion of c-Al_2O_3, SiO_2, and TiO_2 ultrafine particles). *Netsu Bussei*, 1993, vol. 7, no. 4, pp. 227–233. DOI: 10.2963/jjtp.7.227.
7. Lee S., Choi S.U.S., Li S., Eastman J.A. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *The Journal of Heat Transfer*, 1999, vol. 121, no. 2, pp. 280–289. DOI: 10.1115/1.2825978.
8. Wang X., Xu X., Choi S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture. *The Journal of Thermophysics Heat Transfer*, 1999, vol. 13, no. 4, pp. 474–480. DOI: 10.2514/2.6486.
9. Xie H., Wang J., Xi T., Liu Y., Ai F., Wu Q. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *The Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 91, no. 7, pp. 4568–4572. DOI: 10.1063/1.1454184.
10. Das S.K., Putra N., Thiesen P., Roetzel W. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *ASME The Journal of Heat Transfer*, 2003, vol. 125, no. 4, pp. 567–574. DOI: 10.1063/1.1454184.
11. Wen D., Ding Y. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ-alumina nanofluids. *The Journal of Nanoparticle Research*, 2005, vol. 7, no. 2–3, pp. 265–274. DOI: 10.1007/s11051-005-3478-9.
12. Li C.H., Peterson G.P. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *The Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 84, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1205/cherd.04253.
13. Barbes V., Paramo R., Blanco E., Pastoriza-Gallego M.J., Pineiro M.M., Legido J.L. Casanova C. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of Al_2O_3 nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, vol. 111, no. 2, pp. 1615–1625. DOI: 10.1007/s10973-012-2534-9.
14. Ruoyu H., Tingting P., Jianzhong Q., Hongzhong L. Synthesis and surface modification of ZnO nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol. 119, no. 2, pp. 71–81. DOI: 10.1016/j.cej.2006.03.003.
15. Jun Y., Ronghui Zh., Chengbin Zh., Qun S., Yi L., Chongying L., Xiandeng H. Size-controllable synthesis of spherical ZnO nanoparticles: size- and concentration-dependent resonant light scattering. *Microchemical Journal*, 2012, vol. 100, pp. 61–65. DOI: 10.1016/j.microc.2011.09.002.
16. Hutera B., Kmita A., Olejnik E., Tokarski T. Synthesis of ZnO nanoparticles by thermal decomposition of basic zinc carbonate. *Journal of Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 489–491. DOI: 10.2478/amm-2013-0023.
17. Zhang S.Z., Li X.G. Preparation of ZnO particles by precipitation transformation method and its inherent formation mechanisms. *Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochem*, 2003, vol. 226, pp. 35–44. DOI: 10.1016/S0927-7757(03)00383-2.
18. Meulenkamp E.A. Synthesis and growth of ZnO nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry*, 1998, vol. 102, no. 29, pp. 5566–5572. DOI: 10.1021/jp980730h.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Коскин Антон Павлович – родился в 1980 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории исследования наноструктурированных катализаторов и сорбентов Института катализа СО РАН. Область научных интересов: твердые кислоты, гетерогенный катализ, нитрование ароматических соединений, тонкий органический синтез. Опубликовано 23 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5. E-mail: koskin@catalysis.ru).

Koskin Anton Pavlovich (b. 1980) – Candidate of Sciences (Eng.), researcher, LNCSR department, Borescov Institute of Catalysis. His research interests are currently focused on solid acids, heterogeneous catalysis, aromatic nitration, fine organic chemistry. He is author of 23 scientific papers. (Address: 5, Pr. Akad. Lavrentieva, Novosibirsk, 630128, Russia. E-mail: koskin@catalysis.ru).

Попов Сергей Александрович – родился в 1976 году, канд. хим. наук, руководитель компании ООО «Новые технологические решения». Область интересов: наночастицы металлов и оксидов, наноразмерные золи, тонкий органический синтез. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 633011, Россия, Бердск, ул. Попова, 11/3. E-mail: ma-montforyou@gmail.com).

Popov Sergey Alexandrovich (b. 1976) – Candidate of Sciences (Chem.), head of the company “New technological solutions” Ltd. His research interests are currently focused on nanoparticles of metals and metal oxides, nanoscale soles and nanofluids, fine organic chemistry. He is author of 10 scientific papers. (Address: 11/3, Popova str., Berdsk, 633011, Russia. E-mail: ma-montforyou@gmail.com).

Щербашина Анастасия Васильевна – родилась в 1999 году, студентка Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: синтез наноразмерных золей, исследование теплопроводности наносуспензий (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vasya.shch.a@mail.ru).

Shcherbashina Anastasia Vasil’evna (b. 1999) – student of Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on metal oxide sol-gel synthesis and nanofluids heat-transfer investigation. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vasya.shch.a@mail.ru).

Статья поступила 29 мая 2019 г.
Received May 29, 2019

To Reference:

Koskin A.P., Popov A.S., Shcherbashina A.V. Razrabotka sostavov i issledovanie teploprovodyashchikh svoistv nanosuspenzii s soderzhaniem oksida tsinka [The composition development and the heat transfer investigation of zinc oxide nanofluids]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 7–15. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-7-15.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2019 апрель–июнь № 2 (43)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.31

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОМ С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Д.Л. Калужский[1], А.Д. Мехтиев[2], А.С. Харитонов[1], Н.А. Уваров[1],
[1]*Новосибирский государственный технический университет*
[2]*Карагандинский государственный технический университет*

В представленной статье рассматривается адаптивная система управления генератором с комбинированным возбуждением, используемым в ветряной установке. Проанализированы условия функционирования электрической машины, способной работать и как двигатель (в стартерном режиме), и как генератор. Авторами получены уравнения индуктивных параметров, электрического равновесия и момента; разработана функциональная схема, обеспечивающая запуск ветроустановки и стабильное выходное напряжение при варьировании скорости вращения и уровня нагрузки.

Ключевые слова: ветроустановка, многополюсный генератор с комбинированным возбуждением, адаптивная система управления.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-16-26

Введение

Известно, что существующие системы генерирования электроэнергии с помощью ветроустановок, как правило, используют в качестве генераторов электрические машины с магнитоэлектрическим возбуждением. Такие объекты имеют немало достоинств. Во-первых, они ориентированы на применение серийных изделий, а значит, их стоимость минимальна. Во-вторых, использование постоянных магнитов обеспечивает отсутствие тепловых потерь на возбуждение и, как следствие, такой генератор характеризуется высоким уровнем КПД, малой массой и габаритами. Наконец, в-третьих, влияние человека на работу ветроустановки сведено к минимуму; включение в рабочий режим (при минимально допустимой скорости ветра) и выключение (при превышении скорости ветра максимально допустимого значения) происходят автоматически.

К недостаткам подобных систем относятся следующие.

1. Наличие «паразитного» момента при обесточенной якорной обмотке, обусловленного магнитной асимметрией машины, появляющейся вследствие целого ряда технологических факторов: неравномерности воздушного зазора; отклонениями от расчетных значений параметров зубцово-пазовой зоны; различными характеристиками постоянных магнитов и т. д. Согласно ряду источников, например [1, 2], величина «паразитного» момента может превышать 30 % от номинального значения, что вынуждает разработчиков ограничивать работу ветроустановок, начиная с некой минимальной скорости ветра.

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования МОН РК 2018–2020 гг. «Микротепловая электростанция когенерационного типа с рекуперацией тепла» (№ AP05131751) договор № 198 от 16.03.2018.

© 2019 Д.Л. Калужский, А.Д. Мехтиев, А.С. Харитонов, Н.А. Уваров

2. ЭДС в генераторе с магнитоэлектрическим возбуждением (МЭГ) определяется частотой вращения вала. Реальная скорость ветра, используемая для получения электроэнергии, может находиться в диапазоне от 3–4 до 20–25 м/с. Учитывая, что срок службы аккумуляторов в значительной мере зависит от того, насколько ток заряда отличается от паспортного значения, разработчики вынуждены либо ограничивать рабочий диапазон скоростей, либо использовать дорогостоящую преобразовательную технику, чтобы стабилизировать выходное напряжение [3].

3. Чтобы обеспечить возможность заряда при минимальной скорости ветра и максимальной нагрузке, разработчики вынуждены проектировать генераторы таким образом, чтобы выпрямленное напряжение в них превышало напряжение аккумулятора. Практически во всех остальных режимах работы генератор вырабатывает напряжение большее по величине, чем требуется. Поэтому для качественного электроснабжения потребителя меры, представленные в п. 2, просто необходимы.

1. Постановка задачи

Для устранения вышеперечисленных недостатков было предложено техническое решение, суть которого состоит в следующем. В качестве генератора и стартера взята синхронная многополюсная машина с комбинированным возбуждением и дискретно-распределенной обмоткой на статоре [4, 5]. Ее основными достоинствами являются следующие.

Многополюсное исполнение, а значит, даже на низких частотах она создает ЭДС высокой частоты и имеет неплохие энергетические характеристики.

В генераторе опорный поток (60–85 % от максимального значения) создается за счет постоянных магнитов. Поэтому потери на возбуждение невелики и даже в том случае, когда диапазон регулирования ЭДС достигает трех относительных единиц, потери в контуре возбуждения не превышают 25–30 % от всех тепловых потерь в машине.

Генератор способен обеспечить варьирование ЭДС в диапазоне 3–4 относительных единиц и значительно расширяет область применения ветроустановки.

Другой особенностью принимаемого технического решения является использование адаптивной системы управления генератором, способной поддерживать стабильное выходное напряжение за счет изменения тока возбуждения и осуществлять стартерный пуск при минимально возможной скорости ветра.

2. Теория

Для повышения точности расчетов и упрощения вывода конечных уравнений авторы воспользовались модифицированными функциями Радемахера и «пилообразными» функциями [6, 7], представленными на рис. 1 для нахождения МДС 1 и семи катушек, в случае, когда $m = 3$, $s = 3$, $p_1 = 2$.

Представляя МДС фаз в виде произведения временных и пространственных (т. е. функций Радемахера) составляющих и пренебрегая вытеснением магнитного потока от обмотки возбуждения в паз [7], вычислим энергию поля в зазоре [8].

Выполнив необходимые операции и вынося константы, получим несколько интегральных выражений, представляющих собой «пилообразные» функции:

$$W_{\text{эм}}^{sr} = \frac{\mu_0 D_a L_a}{16\delta k_\delta} N_1 F_k^s(t) \cdot \overrightarrow{I_s^T} \times \overrightarrow{A^{sr}} \times \overrightarrow{I_r} \cdot F_r .$$

Здесь D_a, L_a – внутренний диаметр и длина статора; δk_δ – приведенный воздушный зазор; $F_k^s(t)$ – временная составляющая МДС фазы; $N_1 = p_1 / p_2$ – коэффициент; $\overrightarrow{I_s} = \text{colon}\{1, 1, ..., 1\} = \overrightarrow{I_r}$ – столбцевые матрицы.

$$A^{sr} = \begin{array}{|c|c|}
\hline
pL(0, p_2) & pL(-\bar{b}_n, p_2) \\
\hline
-pL(\beta, p_2) & -pL(\beta - \bar{b}_n, p_2) \\
\hline
-pL(\beta, p_2) & -pL(\beta - \bar{b}_n, p_2) \\
\hline
pL(2\beta, p_2) & pL(2\beta - \bar{b}_n, p_2) \\
\hline
pL(2\beta, p_2) & pL(2\beta - \bar{b}_n, p_2) \\
\hline
-pL(3\beta, p_2) & -pL(3\beta - \bar{b}_n, p_2) \\
\hline
\end{array}$$

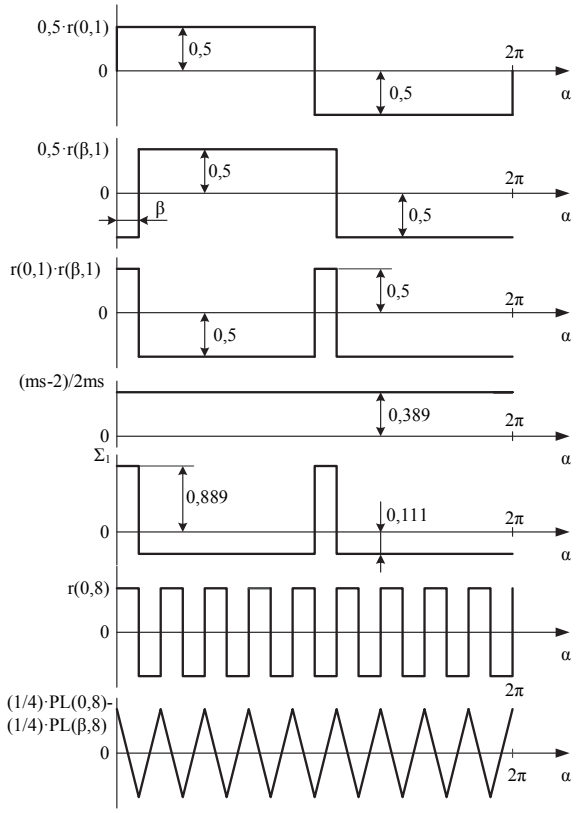


Рис. 1 – Модифицированные функции Радемахера и «пилообразные» функции

p_1 – число фазных зон; s – число согласно включенных катушек в фазной зоне; m – число фаз; α – угол вдоль внутренней поверхности статора; $p = p_1/2 = 1$ – число периодов изменения функции Радемахера; θ – угловое положение ротора; β – начальная фаза

Fig. 1 – Modified Rademacher functions and “sawtooth” functions:

p_1 – the number of phase zones; s – the number according to the included coils in the phase zone; m – number of phases; α – angle along the inner surface of the stator; $p = p_1 / 2 = 1$ – the number of periods of change of the Rademacher function; θ – the angular position of the rotor; β – initial phase

Суммирование «пилообразных» функций с учетом их начальных фаз происходит аналогично сложению пространственных МДС отдельных катушек в распределенных обмотках, в результате чего в уравнениях индуктивностей появляются коэффициенты укорочения и распределения. В рассматриваемом случае взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и *k*-й фазой трехфазной обмотки будет равна

$$L_{k\nu}^{sr}(\theta) = \frac{16 \cdot D_a L_a \mu_0 w_k s k_{p\nu} k_{\beta\nu} w_b}{\pi \nu^2 \delta_1 k_\delta (ms \pm 1)} \times$$

$$\times \cos \nu \left[p_2 \theta + \frac{m-1}{m} \pi (k-1) \right], \qquad (1)$$

где ν – порядковый номер гармоники;

$$k_{\beta\nu} = \cos(\frac{\nu\pi}{2ms}) \cos(\frac{\nu\pi b_2}{2\tau});$$

$$k_{p\nu} = \frac{\sin(\frac{\nu\pi}{2m})}{s \cdot \sin(\frac{\nu\pi}{2ms})}.$$

В свою очередь, потокосцепление, обусловленное наличием на роторе магнитов и наводящее ЭДС в *k*-й фазе, будет равно

$$\Psi_{k\nu}^{sr}(\theta) = \frac{16 D_a L_a w_k s k_{p\nu} k_{\beta\nu} B_0}{\pi \nu^2 \delta_1 k_\delta (ms \pm 1)} \times$$

$$\times \cos \nu [p_2 \theta + \frac{m-1}{m} \pi (k-1)]. \qquad (2)$$

Здесь B_0 – амплитуда магнитной индукции, созданной магнитами; знак «плюс» в (1), (2) ставится в том случае, когда $2p_2 > msp_1$.

Записав уравнения напряжений для прямой и обратной последовательности в осях, синхронно вращающихся с угловой частотой ω, а затем выполнив преобразования к осям d, q, 0, получим выражения напряжений:

$$u_d = p \frac{\sqrt{m}}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) + (r^s + pL^s) i_d - \omega L^s i_q,$$

$$u_q = \omega \frac{\sqrt{m}}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) + (r^s + pL^s) i_q + \omega L^s i_d$$

и, пренебрегая потокосцеплением по оси *q*, получим уравнение момента

$$M = p_2 \frac{m}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) i_q.$$

Полученные уравнения позволяют в линейной постановке задачи проводить инженерные расчеты и сравнивать различные типы электрических машин с единых позиций.

Ниже на рис. 2 представлена структурная схема с микропроцессорной системой управления (МПСУ) силовой части для прохождения «мертвой» зоны при пуске ветроустановки и для регулирования величины ЭДС при варьировании частоты вращения и нагрузки.

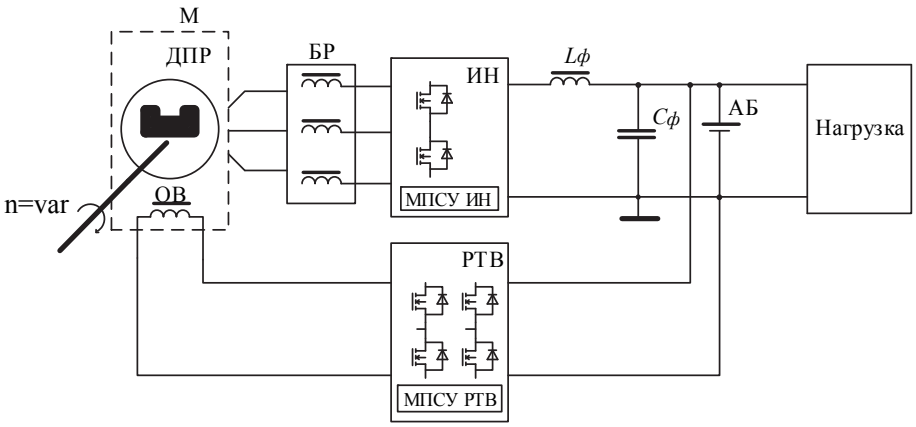


Рис. 2 – Структурная схема с микропроцессорной системой управления (МПСУ):

М – ветроустановка; ДПР – датчик положения ротора двигателя; ОВ – обмотка возбуждения двигателя; БР – блок реакторов; ИН – инвертор напряжения; МПСУ ИН – микропроцессорная система управления ИН; РТВ – регулятор тока возбуждения; МПСУ РТВ – микропроцессорная система управления РТВ; Lф и Сф – индуктивность и емкость выходного LC фильтра; АБ – аккумуляторная батарея

Fig. 2 – Block diagram with microprocessor control system (MPSU):

M – wind turbine; DPR – engine rotor position sensor; OV – motor field winding; BR - reactor block; IN – voltage inverter; MPSU IN – microprocessor control system IN; RTV – excitation current regulator; MPSU RTV – microprocessor control system RTV; Lf and Cf – inductance and capacitance of the output LC filter; AB – rechargeable battery

Система управления работает в двух режимах, а именно в режиме электростартерного запуска и в режиме генерирования. В режиме электростартерного запуска обеспечивается двигательный режим работы, управление и электропитание осуществляются с помощью инвертора напряжения и аккумуляторной батареи. Регулирование тока возбуждения осуществляется с заданием на ток возбуждения равным нулю.

После перехода электрической машины в режим генерирования инвертор напряжения работает как активный выпрямитель (АВ), осуществляя по определенному закону преобразование переменного напряжения в постоянное, с последующей передачей его в нагрузку. АВ представляет собой инвертор напряжения, работающий в обращенном режиме, может быть выполнен на IGBT или MOSFET модулях в зависимости от требований принадлежности комплектующих. Силовой *LC*-фильтр служит для обеспечения заданного уровня пульсаций в выходном напряжении в режиме генерирования, а также для частичного шунтирования аккумуляторной батареи в режиме электростартерного запуска. РТВ выполнена на базе однофазного транзисторного реверсивного преобразователя с широтно-импульсным регулированием. Необходимость такой реализации вызвана требованием реверса тока возбуждения. Любая другая схемная реализация РТВ потребует установки дополнительных индуктивностей и конденсаторов. АВ в режиме генерирования штатно работает как обычный неуправляемый выпрямитель за счет «обратных» диодов.

МПСУ осуществляет управление, защиту, встроенный автоматический контроль, а также, при необходимости, связь с системами управления верхнего уровня.

Система автоматического регулирования (САР) выходного напряжения реализуется посредством управления током возбуждения электрической машины. В контур регулирования входит обмотка возбуждения и собственно электрическая машина с выпрямителем и силовым фильтром.

При синтезе структуры САР была принята система подчиненного регулирования с последовательной коррекцией, что обосновывалось следующими достоинствами подобного рода систем:

- возможностью достижения оптимальных показателей качества переходных процессов;
- отлаженной методикой настройки регуляторов;
- возможность ограничения регулируемых величин.

Свойство подобного рода систем обеспечивать переходные процессы с малым перерегулированием и относительно высоким быстродействием является важным для рассматриваемого применения, так как нагрузка в данном случае является весьма динамичной.

Структурная схема САР выходного напряжения электрической машины приведена на рис. 3.

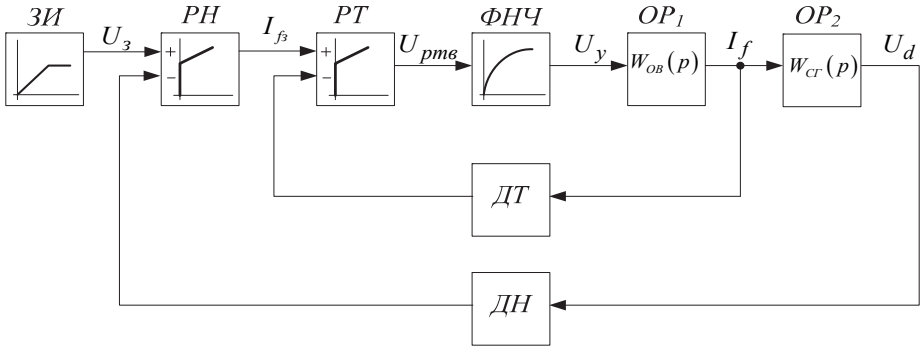


Рис. 3 – Структурная схема САР выходного напряжения электрической машины:

ЗИ – задатчик интенсивности, ограничивает скорость нарастания задающей величины; РН, РТ – регуляторы напряжения и тока, реализуют пропорционально-интегральный (ПИ) закон управления; ФНЧ – фильтр нижних частот, определяет полосу пропускания САР; ОР1, ОР2 – объекты регулирования, первый из них представляет мостовой транзисторный преобразователь с обмоткой возбуждения, второй – электрическую машину с выпрямителем и силовым фильтром; ДТ – датчик тока возбуждения; ДН – датчик выходного напряжения

Fig. 3 – Block diagram of the ATS of the output voltage of an electric machine:

ZI – intensity adjuster, limits the slew rate of the set value; RN, RT – voltage and current regulators, realize the proportional-integral (PI) control law; Low-pass filter – low-pass filter, determines the bandwidth of the ATS; OP1, OP2 – objects of regulation, the first of them is a bridge transistor converter with an excitation winding, the second is an electric machine with a rectifier and a power filter; DT – field current sensor; DN – output voltage sensor

Как следует из рис. 3, САР является двухконтурной, при этом внутренний контур обеспечивает регулирование тока возбуждения, а внешний контур – регулирование выходного напряжения.

Для первого объекта регулирования (ОР1), в который входят мостовой транзисторный преобразователь с обмоткой возбуждения электрической машины, передаточная функция апериодического звена первого порядка достаточно точно опи-

сывает поведение объекта. Для внешнего контура с объектом регулирования, включающим электрическую машину с выпрямителем и силовым фильтром, описание ОР такой передаточной функцией является в известном роде упрощением, так как электрическая машина является сложным нелинейным объектом. В расчет берется только свойство управляемого по цепи ОВ и последовательно соединенного с ним неуправляемого выпрямителя (НВ). НВ необходим для преобразования, с определенными коэффициентом и постоянной времени, трехфазного напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока.

Для каждого контура регулятор конструируется по одной и той же стандартной методике. Передаточная функция регулятора

$$R(p) = Kp + \frac{1}{Tr \cdot p},$$

где Kp – коэффициент усиления регулятора; Tr – постоянная времени регулятора, равные соответственно:

$$Kp = T / Ti;$$

$$Tr = Ti / \lambda,$$

где T и λ – параметры передаточной функции ОР; Ti – постоянная интегрирования, определяемая из условия настройки регулятора на модульный оптимум:

$$Ti = k \cdot T\mu,$$

где k – коэффициент, равный 2 для первого контура регулирования, для каждого следующего контура коэффициент умножается на два; $T\mu$ – базовая некомпенсируемая постоянная времени САР. Данный параметр определяет полосу пропускания системы и выбирается исходя из необходимого быстродействия САР и скорости протекания регулируемых в контурах процессов. При настройке САР на модульный оптимум необходимо помнить, что быстродействие каждого внешнего контура уменьшается вдвое в сравнении с его внутренним контуром регулирования.

Для ввода базовой постоянной времени на выходе управляющей части САР ставится фильтр нижних частот (ФНЧ), с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{1}{T\mu p + \lambda}.$$

Таким образом, мы конструируем САР с желаемой степенью инерционности и соответствующей полосой пропускания.

Поскольку электрическая машина имеет смешанный тип возбуждения, то часть потока возбуждения в ней создается постоянными магнитами, остальная часть – током возбуждения. Соотношение составляет примерно 70 и 30 % соответственно. Регулирование величины выходного напряжения, отдаваемого в нагрузку, может осуществляться как АВ, так и током возбуждения. В том случае, если РТВ будет не хватать диапазона регулирования, АВ может его дополнить. Наиболее оптимальным регулирование величины выходного напряжения становится при совместном управлении АВ и РТВ.

К достоинствам выбранной схемы управления следует отнести:

- относительно небольшое количество силовых элементов;

• относительно небольшое количество дискретных элементов в МПСУ (малое количество драйверов силовых ключей).

Недостатком выбранной схемы является то, что силовые ключи должны выбираться на максимальный ток режима электростартерного запуска и поэтому могут иметь большую массу и габариты.

3. Результаты

По результатам исследований спроектирован и изготовлен многополюсный генератор, технические параметры которого представлены ниже.

Технические параметры электрической машины
Technical parameters of an electric machine

Полезная мощность, Вт	1800
Максимальная частота вращения, об/мин	1500
Минимальная частота вращения, об/мин	500
Максимальный момент по S1, Нм	12
Ток номинальный, не более, А	52
Напряжение в звене постоянного тока, В	36
Число фаз	3
Число пар полюсов	8
Электрические потери в обмотке статора, Вт	165
Электрические потери в обмотке возбуждения, Вт	32
Потери в стали статора, не более, Вт	44

4. Обсуждение результатов

Проанализируем полученные результаты.

Метод расчета синхронных электрических машин с использованием «пилообразных» функций и модифицированных функций Радемахера позволяет в аналитическом виде и с высокой точностью записать уравнения электрического равновесия, момента и мощности.

Имея высокий КПД, малую массу и габариты, сопоставимые с аналогичными параметрами магнитоэлектрических генераторов с высококоэрцитивными магнитами на роторе, предложенная электрическая машина способна обеспечить стабильное выходное напряжение в широком диапазоне частот вращения при варьировании нагрузки. Последняя особенность более характерна для генераторов с обмотками возбуждения на роторе, но они, как показано выше, имеют значительно больший уровень тепловых потерь и низкий КПД.

Разработанная адаптивная система управления возбуждением генератора способна самостоятельно осуществить стартерный пуск при малой ветровой нагрузке и за счет увеличения магнитного потока поддерживать стабильное напряжение даже при номинальной нагрузке.

Адаптивная система содержит минимальное число силовых элементов и небольшое число драйверов силовых ключей, что существенно снижает ее массу, габариты и, самое главное, стоимость. А поскольку отличие предложенного генератора от существующих промышленных образцов МЭГ состоит только в наличии кольцевой обмотки возбуждения на статоре, общая себестоимость изделия не увеличится, а само оно будет конкурентоспособным в ветроэнергетике.

Заключение

В статье приведены теоретические исследования, ставящие своей целью получение уравнений специального многополюсного генератора с комбинированным возбуждением, работающего в автономной системе электроснабжения. В качестве движителя в системе используется ветроустановка. Для запуска ветроустановки при малой ветровой нагрузке и преодоления «мертвой зоны» разработана структурная схема с микропроцессорной системой управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веселовский О.Н., Калужский Д.Л.** Индукторные машины с дискретно-распределенными обмотками // Электротехнические системы транспортных средств и их роботизированных производств: научно-техническая конференция с международным участием. – М.: Суздаль, 1995. – С. 7–8.
2. **Веселовский О.Н., Калужский Д.Л.** Синхронный редукторный двигатель // Fourth International conference on unconventional electromechanical and electrical systems: proceedings. – Szczecin: Techn. univ. press, 1999.
3. **Taran A.V., Frantsuzova G.A., Kharitonov S.A.** Control system of electric power steering // Proceedings of the IASTED International Conference "Automation, Control, and Information Technology", Novosibirsk, Russia, June 10–13, 2002. – Novosibirsk, 2002. – P. 121–124.
4. Патент 107418 Российская Федерация. Индукторная машина переменного тока комбинированного возбуждения / Д.В. Левин, Э.Я. Лившиц, М.М. Юхнин. – № 2010146046/07; заявл. 12.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
5. **Калужский Д.Л., Мехтиев А.Д., Югай В.В.** Электрическая машина с комбинированным возбуждением. Заявление о выдаче патента Республики Казахстан на изобретение № 2018/0906.1.
6. **Веселовский О.Н., Калужский Д.Л.** Уравнения электрического равновесия и момента синхронных и асинхронных двигателей с дискретно-распределенными обмотками // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 31–36.
7. **Калужский Д.Л.** Электрические машины с дискретно-распределенными обмотками для низкоскоростных электроприводов // Электротехника. – 1997. – № 9. – С. 10–13.

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF A GENERATOR WITH A COMBINED EXCITATION IN WIND POWER

D.L. Kaluzhskii[1], A.D. Mekhtiyev[2], A.S. Kharitonov[1], N.A. Uvarov[1]

[1] *Novosibirsk State Technical University/Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk, Russia*

[2] *Karaganda State Technical University/Department of Electronics and Electrical Engineering, Karaganda, Kazakhstan*

This article discusses the adaptive control system of a generator with a combined excitation used in a wind farm. The conditions for the functioning of an electric machine capable of operating as an engine (in starter mode) and as a generator are analyzed. The authors obtained the equations of inductive parameters, electrical equilibrium and moment; A functional circuit has been developed to ensure the launch of a wind turbine and a stable output voltage with varying rotational speed and load level.

Keywords: wind turbine, multi-pole generator with combined excitation, adaptive control system.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-16-26

REFERENCES

1. Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L. [Inductor machines with discrete-distributed windings]. *Elektrotekhnicheskie sistemy transportnykh sredstv i ikh robotizirovannykh proizvodstv*: nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem [Electrotechnical systems of vehicles and their robotic industries: a scientific and technical conference with international participation]. Moscow, Suzdal' Publ., 1995, pp. 7–8. (In Russian).
2. Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L. [Synchronous gear motor]. *Fourth International conference on unconventional electromechanical and electrical systems: proceedings*. Szczecin, Techn. univ. press, 1999.
3. Taran A.V., Frantsuzova G.A., Kharitonov S.A. Control system of electric power steering. *Proceedings of the IASTED International Conference "Automation, Control, and Information Technology"*, Novosibirsk, Russia, June 10–13, 2002, pp. 121–124.
4. Levin D.V., Livshits E.Ya., Yukhnin M.M. *Induktornaya mashina peremennogo toka kombinirovannogo vozbuzhdeniya* [Inductor AC machine combined excitation]. Patent RF, no. 107418, 2011.
5. Kaluzhskii D.L., Mekhtiyev A.D., Yugai V.V. *Elektricheskaya mashina s kombinirovannym vozbuzhdeniem* [Electric machine with a combined excitation]. Application for the grant of a patent of the Republic of Kazakhstan for the invention no. 2018/0906.1.
6. Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L. Uravneniya elektricheskogo ravnovesiya i momenta sinkhronnykh i asinkhronnykh dvigatelei s diskretno-raspredelennymi obmotkami [Equations of electric equilibrium and moment of synchronous and asynchronous motors with discrete-distributed windings]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2000, no. 5, pp. 31–36.
7. Kaluzhskii D.L. Elektricheskie mashiny s diskretno-raspredelennymi obmotkami dlya nizkoskorostnykh elektroprivodov [Electrical machines with discrete-distributed windings for low-speed electric drives]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 1997, no. 9, pp. 10–13. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Калужский Дмитрий Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Работает в НГТУ с 1980 года. Область научных интересов – бесщеточные электрические двигатели, системы управления бесщеточными электрическими двигателями. Имеет более 40 научных публикаций. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: verp307@mail.ru).

Kaluzhskii Dmitry Leonidovich – Doctor of Sciences (Eng.), Professor of department "Electronics and Electrical Engineering", NSTU graduated from Novosibirsk Institute of Electrical Engineering (NIEE) in 1980. He works in NSTU (NIEE) from 1980. His area of scientific research is brushless electric motors and their control systems. Prof. Kaluzhskii has more than 40 papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: verp307@mail.ru).

Мехтиев Али Джаванширович – канд. техн. наук, зав. кафедрой технологии и системы связи Карагандинского государственного технического университета (КГТУ). Окончил КГТУ в 1999 году. Работает в КГТУ с 1999 года. Область научных интересов: электродвигатели, электротехника, механика. Имеет более 106 научных публикаций. (Адрес: 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich – Candidate of sciences (Eng.), the Head of the "Technology and communication systems" Department of Karaganda State Technical University (KSTU). Graduated from KSTU in 1999. He works in KSTU from 1999. His area of scientific research is gearless energy, electric motors, electrical engineering, mechanics. Has more than 106 papers. (Address: 56, Nursultan Nazarbayev Av., Karaganda, 100027, Republic Kazakhstan. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Харитонов Андрей Сергеевич – ведущий инженер, ИНОЦ «Силовая электроника», кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Область научных интересов: управляемый электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами, управляемые системы генерирования энергии с синхронным магнитоэлектрическим генератором (МЭГ), авиационные стартер-генераторные системы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: andrekh@yandex.ru).

Kharitonov Andrey Sergeevich – Lead engineer, Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University, NSTU. His research interests are currently focused on control motor drive based on PMSM, systems of generating electrical energy based on synchronous generator, starter generator based on synchronous generator with permanent magnets for aircrafts and helicopters. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: andrekh@yandex.ru).

Уваров Никита Алексеевич – получил степень бакалавра в области электроники и наноэлектроники на кафедре электроники и электротехники в Новосибирском государственном техническом университете, (НГТУ) в 2017 году. Область научных исследований – безредукторные электродвигатели и их системы управления. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: uvarov.nik.64@gmail.com).

Uvarov Nikita Alekseevich received B.S. degree in Electronics and Nanoelectronics from Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University, NSTU, in 2017. His area of scientific research is brushless electric motors and their control systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: uvarov.nik.64@gmail.com).

Статья поступила 08 апреля 2019 г.
Received April 08, 2019

To Reference:

Kaluzhskii D.L., Mekhtiyev A.D., Kharitonov A.S., Uvarov N.A. Adaptivnaya sistema upravleniya generatorom s kombinirovannym vozbuzhdeniem v vetroenergetike [Adaptive control system of a generator with a combined excitation in wind power]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 16–26. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-16-26.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2019 апрель–июнь № 2 (43)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.969.34

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В КАЧЕСТВЕ СИГНАЛОВ ПОДСВЕТА В ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ

И.Н. Козлов[1], А.Г. Вострецов[1,2]
[1]*Новосибирский государственный технический университет*
[2]*Институт горного дела Сибирского отделения РАН*

В статье рассмотрено использование спутниковых навигационных систем в качестве сигналов подсвета в пассивных радиолокационных станциях. Методом имитационного моделирования получены оценки энергетических параметров спутниковых сигналов, рассчитаны геометрические размеры приемной антенны, время накопления, а также сформированы критерии определения дальности и высоты полета цели для ее обнаружения с заданным отношением сигнал/шум.

Ключевые слова: навигационные системы, отношение сигнал/шум, сигналы подсвета, пассивная радиолокационная станция.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-27-37

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется созданию радиолокационных станций (РЛС) со сторонним подсветом [1]. Такие РЛС являются пассивными и для облучения целей используют сторонние передатчики, чьи сигналы называются сигналами подсвета. Сторонний передатчик может находиться на значительном удалении от приемника. Главной задачей приемного канала пассивной системы становится детектирование и селекция отраженных от различных объектов сигналов в заданном пространстве [2]. Хорошо известны преимущества пассивных РЛС по сравнению с активными радиолокационными станциями, в частности отсутствие передающего тракта делает систему скрытной, простой и дешевой. К недостаткам пассивных РЛС с подсветом можно отнести их ограниченную дальность действия из-за зависимости от мощности сигнала подсвета и принимаемого отклика в приемном тракте. Для определения координат цели требуется многопозиционная система. В настоящее время уже разработаны и серийно выпускаются пассивные РЛС с подсветом, например, «Автобаза», «Тамара», «Рамона-Планшет», «Орден» и т. п. [3], использующие в качестве сигналов подсвета радиовещательные станции УКВ и КВ диапазона, аналоговые и цифровые ТВ-передатчики. В качестве альтернативного источника могут выступать сигналы спутниковых навигационных систем. В настоящее время только две спутниковые системы обеспечивают полное покрытие земного шара – GPS (система глобального позиционирования) и ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система). С точки зрения сигналов подсвета принципиально не важно, какой сигнал будет использоваться, GPS или ГЛОНАСС. Главной особенностью такого сигнала подсвета является его наличие в любой точке земного шара, без привязки к населенным пунктам. Следует отметить, что сами спутники находятся на большом удалении от земной поверхности. В связи с этим уровень сигналов подсвета оказывается чрезвычайно низким.

Целью настоящей работы является оценка возможности использования сигналов спутниковых навигационных систем в качестве сигналов подсвета в пассивных РЛС.

© 2019 И.Н. Козлов, А.Г. Вострецов

1. Постановка задачи

Для оценки возможности использования спутникового сигнала в качестве сигнала подсвета в пассивной РЛС необходимо решить следующие задачи:

- оценить энергию отраженного от цели сигнала спутниковой навигационной системы в точке приема;
- определить требуемую чувствительность приемника;
- на основе полученных данных оценить возможность использования сигналов спутниковых навигационных систем в качестве сигналов подсвета.

2. Оценка энергетических параметров сигналов спутниковых навигационных систем

Рассмотрим сигналы, излучаемые группировками спутников GPS и ГЛОНАСС [5]. Их основные характеристики приведены в табл. 1.

Каждый GPS-спутник излучает навигационные сигналы на двух частотах f_1 и f_2 в виде фазоманипулированных псевдослучайных последовательностей. Первый сигнал (на частоте f_1) содержит код clear/acquisition (C/A), который является общедоступным и позволяет получать лишь приблизительную оценку местоположения объекта. Второй сигнал (код P – precision code) обеспечивает более точное вычисление координат и передается на частоте f_2 с применением сверхдлинной псевдослучайной последовательности [4].

Все спутники ГЛОНАСС также используют псевдослучайную кодовую последовательность для передачи открытых сигналов, однако в группировке спутников используется частотное разделение каналов. Сведения о распределении частот по каналам содержатся в альманахе системы. Несущие частоты различаются на 0,5625 МГц в диапазоне f_1 (код стандартной точности (СТ)) и на 0,4375 МГц в диапазоне f_2 (код высокой точности (ВТ)). Основные характеристики спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Основные характеристики спутников GPS и ГЛОНАСС
The main characteristics of satellite GPS and GLONASS

Спутниковая система	GPS	ГЛОНАСС
Количество спутников в группировке	24 основных 3 резервных	24 основных 3 резервных
Высота орбиты, км	20200	19100
Несущие частоты радиосигналов, МГц	f_1 = 1575,42 f_2 = 1227,60	f_1 = 1600,99 – 1615,5 f_2 = 1248,06 – 1256,5
Период повторения дальномерного кода, мс	1	1
Тактовая частота дальномерного кода, МГц	1,023	0,511
Число элементов кода	1023	511
Тип дальномерного кода	код Голда	М-последовательность
Минимальная мощность на входе приемника, дБВт	−161,5	–161
Способ разделения сигналов	Кодовый	Частотный
Ширина спектра сигнала, МГц	$\Delta F_C(P) = 10.23$ $\Delta F_C(C/A) = 1.023$	$\Delta F_C(BT) = 5.011$ $\Delta F_C(CT) = 0.511$

Одним из показателей качества приемного тракта является чувствительность приемника. Чувствительность определяется как наименьший уровень входного сигнала устройства, при котором обеспечивается требуемое отношение сигнал/шум. Значение мощности шума зависит от коэффициента шума приемника и ширины спектра принимаемого сигнала и определяется по формуле [6]

$$P_{\text{Ш}} = kT_s\Delta F = 1{,}1kT_0(F-1)\Delta F_{\text{C}}\,, \tag{1}$$

где k – постоянная Больцмана; $T_s = T_0(F-1)$ – шумовая температура приемника; T_0 – шумовая температура приемной антенны; F – коэффициент шума приемника; $\Delta F \approx 1{,}1\Delta F_{\text{C}}$ – эффективная ширина спектра сигнала. Для достижения высокой чувствительности приемника целесообразно во входных цепях использовать криогенные усилители [7, 8].

Определим мощность сигнала в точке приема из основного уравнения радиолокации и радиолокационных свойств объекта [8]. Мощность $P_{\text{прм}}$ спутникового сигнала прямого прохождения в точке приема составит величину

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}}G_{\text{прд}}G_{\text{прм}}\lambda^2}{(4\pi)^2 R_{\text{СП}}{}^2 P_{\text{АТ}}P_{\text{пол}}P_{\text{пр}}}\,, \tag{2}$$

где $P_{\text{прд}}$ – мощность излучения передатчика спутника; $G_{\text{прд}}$ – коэффициент направленного действия передающей антенны; $G_{\text{прм}}$ – коэффициент направленного действия приемной антенны; λ – длина волны навигационного сигнала; $R_{\text{СП}}$ – дальность радиолинии «спутник – приемник»; $P_{\text{АТ}}$ = 2 дБ – коэффициент затухания в атмосфере; $P_{\text{пол}}$ = 1 дБ – коэффициент затухания, связанный с поляризационными потерями; $P_{\text{пр}}$ = 4 дБ – прочие потери.

Для определения отношения сигнал/шум необходимо определить уровень мощности отраженного от цели навигационного сигнала. Мощность P сигнала навигационного спутника, рассеянного целью и принятого приемником, составит величину

$$P = \frac{P_{\text{прд}}G_{\text{прд}}G_{\text{прм}}\lambda^2}{(4\pi)^3 R_{\text{СЦ}}{}^2 R_{\text{ЦП}}{}^2 P_{\text{АТ}}P_{\text{пол}}P_{\text{пр}}}\sigma_{\text{ц}}\,, \tag{3}$$

где $R_{\text{СЦ}}$ – дальность радиолинии «спутник – цель»; $R_{\text{ЦП}}$ – дальность радиолинии «цель – приемник»; $\sigma_{\text{ц}} = S\sigma_0$ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели, зависящая от площади рассеяния S и удельной эффективной площади отраже–ния σ_0, определяемой свойствами цели.

Отношение сигнал/шум в канале прямого прохождения $q_{\text{пр}}$ будет определяться выражением

$$q_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{прм}}}{P_{\text{Ш}}} = \frac{P_{\text{прд}}G_{\text{прд}}G_{\text{прм}}\lambda^2}{(4\pi)^2 R_{\text{СП}}{}^2 P_{\text{АТ}}P_{\text{пол}}P_{\text{пр}}}\left(\frac{1}{kT_s\Delta F}\right). \tag{4}$$

Отношение сигнал/шум в канале отраженного сигнала $q_{\text{отр}}$, который прошел расстояние «передатчик – цель – приемник», будет определяться выражением

$$q_{\text{отр}} = \frac{P}{P_{\text{Ш}}} = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{\text{СЦ}}{}^2 R_{\text{ЦП}}{}^2 P_{\text{АТ}} P_{\text{пол}} P_{\text{пр}}} \sigma_{\text{ц}} \left(\frac{1}{kT_s \Delta F} \right). \quad (5)$$

Множитель $\left(\frac{\lambda^2 G_{\text{прм}}}{4\pi} \right)$ в выражении (5) характеризует эффективную площадь приемной антенны. В формуле (5) уровни мощности получены относительно изотропной антенны. Следовательно, если применить направленную антенну, например, фазированную антенную решетку (ФАР), то можно значительно улучшить отношение сигнал/шум относительно изотропной антены [9, 10]. Кроме усиления сигнала, использование ФАР позволит осуществить быстрое сканирование зоны обзора за счет электронного «качания» луча диаграммы направленности. В качестве примера рассмотрим прямоугольную линейную фазированную антенную решетку и оценим ее геометрические размеры, необходимые для достижения следующих характеристик ФАР:

1) коэффициент усиления ~ 40 дБ;
2) ширина главного лепестка диаграммы направленности 1,5 градуса по вертикали и горизонтали;
3) коэффициент полезного действия ФАР ~ 0,9.

3. Результаты экспериментов

При моделировании использовались следующие исходные данные.

Шумовая температура усилительного тракта приемника была принята равной 5 К, что соответствует усилителю на Si–Ge транзисторах, охлажденному до температуры 4 К [7]. Результаты расчета уровня шумов на входе приемного устройства приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Мощность шума на входе приемного устройства
The noise power to the input of receiver

	GPS		ГЛОНАСС	
	f_1 (C/A)	f_2 (P)	f_1(СТ)	f_2(ВТ)
$P_{\text{Ш}}$, дБВт	–153,961	–143,961	–156,976	–146,976

Геометрические размеры ФАР определялись из выражения

$$S_{\text{геом}} = \left(\frac{102^\circ}{2\theta_{0,7}} d \right)^2, \quad (6)$$

где $2\theta_{0.7} \approx 51^\circ \frac{\lambda}{Nd}$ – ширина диаграммы направленности по уровню 0,707 [9]; η – коэффициент полезного действия фазированной антенной решетки; N – количество излучателей в антенной решетке; $d = 0,5\lambda$ – расстояние между соседними излучателями.

С учетом того, что коэффициент усиления антенны определяется выражением

$$K_{\text{у}} = \left(\frac{4\pi \cdot S_{\text{геом}}}{\lambda^2} \right) \eta, \quad (7)$$

и исходя из сформулированных требований 1) – 3) к характеристикам ФАР, для несущей частоты f_1 GPS (сигнала C/A) было получено $N = 68 \cdot 68 = 4624$, $S_{геом}$ = = 41,919 м^2; $K_у$ = 41,2 дБ. Конечно, антенну с достаточно большой площадью проблематично разместить на мобильной технике и возникают ограничения в расположении системы. Но если сформировать антенную решетку из четырех фрагментов по 10,5 м^2, то вполне возможно размещение на автомобильной технике.

В группировке спутников GPS и ГЛОНАСС энергетические параметры для типовой радиолинии практически одинаковые. Мощность излучения передатчиков $P_{прд}$ = 64 Вт, коэффициент направленного действия передающей антенны $G_{прд}$ = 10 дБ, коэффициент направленного действия приемной антенны $G_{прм}$ = = 42,2 дБ. Дальность радиолинии «спутник – приемник» $R_{СЦ}$ = 20 200 км (наибольшая высота спутников), дальность радиолинии «цель – приемник» $R_{ЦП}$ для исследований была принята в пределах от 1 до 100 км.

В процессе моделирования были использованы данные $\sigma_ц$ относительных эффективных площадей рассеяния (ЭПР), изменяющихся от 0,01 до 1 м^2, что соответствует таким целям, как беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Наибольший интерес представляют микро- и мини-БПЛА ближнего радиуса действия с низкой взлетной массой, относительно невысокой скоростью (до 200 км/ч) и дальностью действия до 40–50 км. В качестве факторов, влияющих на мощность сигнала, рассматривалась высота полета цели и горизонтальное удаление цели от луча «спутник – приемник».

На рис. 1–3 представлены графики зависимостей мощности P отраженных от целей сигналов от расстояния до целей при различных ЭПР целей и высотах их полета.

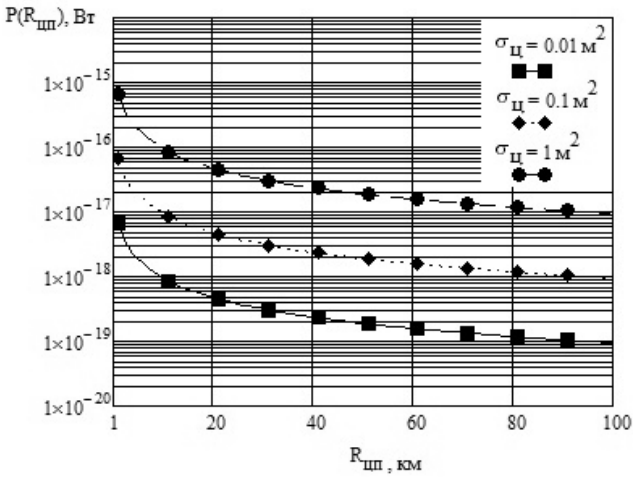


Рис. 1 – Мощность сигнала, рассеянного целью и принятого навигационным приемником для разных ЭПР целей с высотой полета цели 1000 м

Fig. 1 – The power of the signal scattered by the target and received by the navigation receiver for different EPR targets with an altitude target of 1000 m

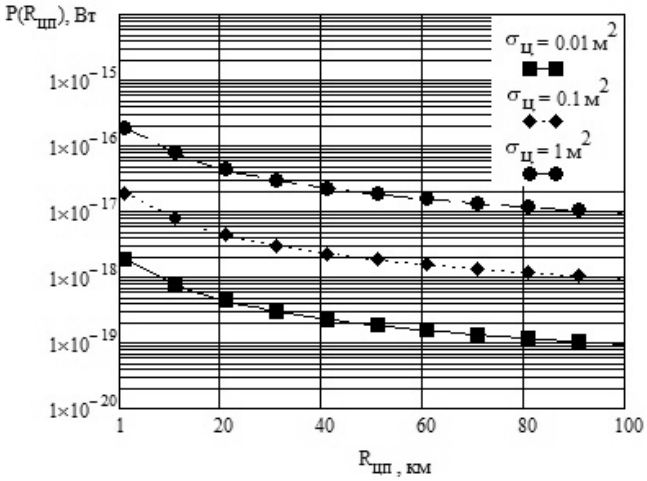


Рис. 2 – Мощность сигнала, рассеянного целью и принятого навигационным приемником для разных ЭПР целей с высотой полета цели 5000 м

Fig. 2 – The power of the signal scattered by the target and received by the navigation receiver for different EPR targets with an altitude target of 5000 m

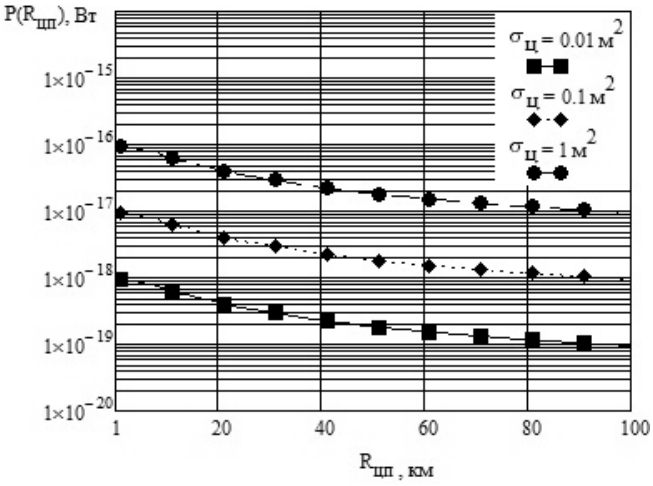


Рис. 3 – Мощность сигнала, рассеянного целью и принятого навигационным приемником для разных ЭПР целей с высотой полета цели 10 000 м

Fig. 3 – The power of the signal scattered by the target and received by the navigation receiver for different EPR targets with an altitude target of 10 000 m

Отношение сигнал/шум на входе приемника, относительно общедоступного сигнала GPS, как одного из наиболее узкополосных сигналов с наибольшим уровнем шума на входе, показано на рис. 4–6.

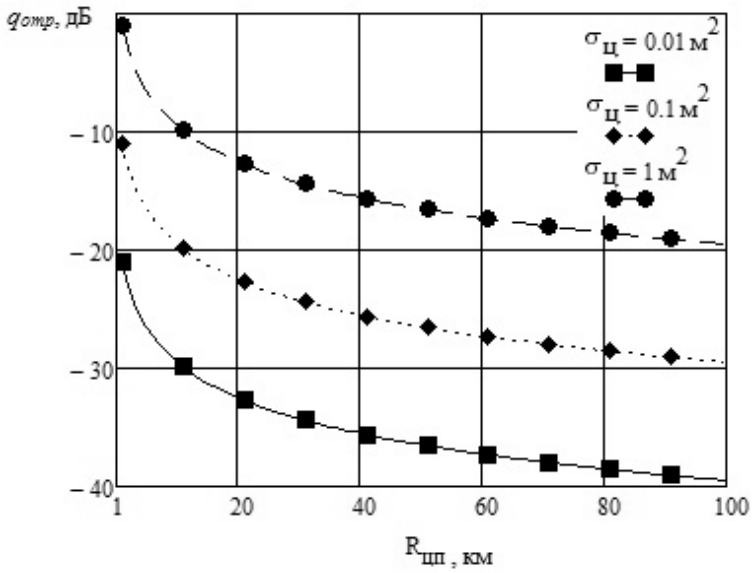


Рис. 4 – Отношение сигнал/шум для разных ЭПР целей с высотой полета цели 1000 м

Fig. 4 – Signal/noise ratio for different EPR targets with a target flight height of 1000 m

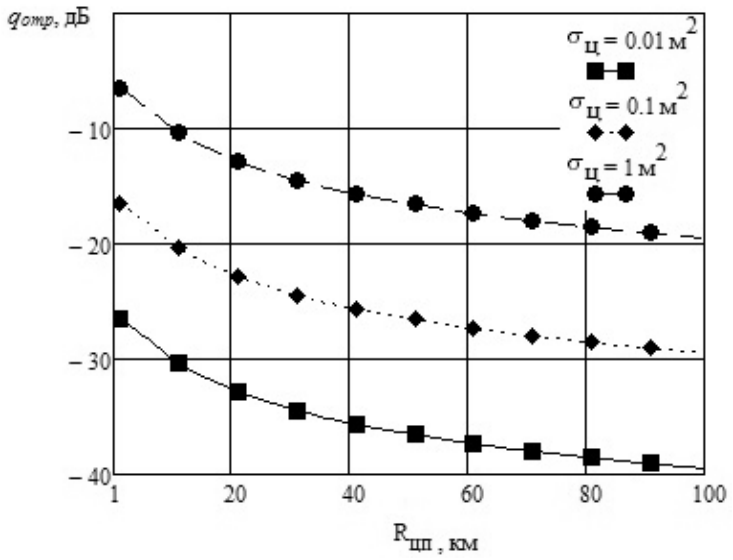


Рис. 5 – Отношение сигнал/шум для разных ЭПР целей с высотой полета цели 5000 м

Fig. 5 – Signal/noise ratio for different EPR targets with a target flight height of 5000 m

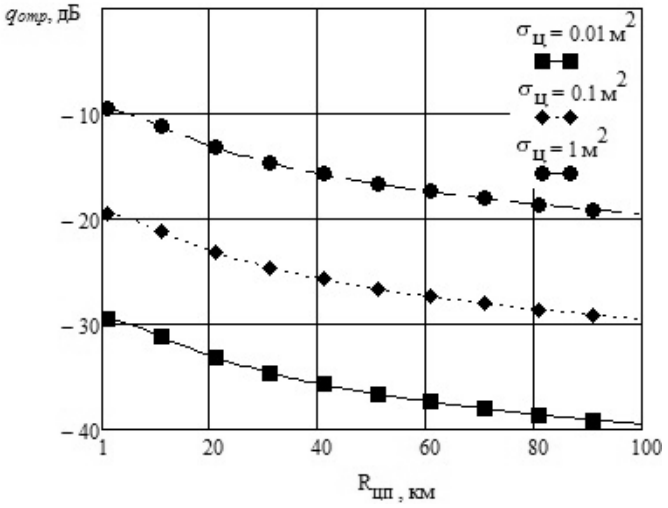


Рис. 6 – Отношение сигнал/шум для разных ЭПР целей с высотой полета цели 10 000 м

Fig. 6 – Signal/noise ratio for different EPR targets with a target flight height of 10 000 m

4. Обсуждение результатов моделирования

Из рис. 4–6 видно, что сигналы, отраженные от малоразмерных целей, обладают очень низкими энергетическими характеристиками, что затрудняет их прием без применения специальных средств.

Для устойчивого обнаружения при вероятности ложной тревоги порядка 10^{-3} необходимо обеспечить отношение сигнал/шум на выходе приемника порядка 13 дБ.

Рассмотрим случай обнаружения цели с ЭПР равной 0,01 м^2, находящейся на высоте 10 000 м, с применением рассмотренной ранее фазированной антенной решетки. Из рис. 6 видно, что отношение сигнал/шум на входе приемника изменяется от –19,5 до –29,5 дБ при изменении дальности от 1 до 100 км. На расстоянии 50 км отношение сигнал/шум составляет величину ≈ 26,5 дБ. Использование согласованного коррелятора позволяет увеличить отношение сигнал/шум на его выходе еще на $10\lg(B)$ = 30 дБ ($B = \Delta F_C T_C$ – база сигнала, T_C – длительность сигнала) [10]. Таким образом, при расстоянии до цели 50 км отношение сигнал/шум на выходе согласованного коррелятора приемника составит величину порядка ≈ 3,5 дБ. Для устойчивого обнаружения с заданной вероятностью ложной тревоги необходимо обеспечить дальнейшее накопление сигнала GPS. Требуемое время когерентного накопления сигнала составит 9 мс. При скорости БПЛА 200 км/ч цель за это время переместится на 0,5 м.

Приведенные расчеты не учитывают влияния доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала, а также помех, обусловленных сигналом прямого прохождения, значительно превышающим по мощности отраженный от цели сигнал и проникающих в приемный тракт через боковые лепестки ФАР. Также большую роль играет тот факт, насколько точно опорный сигнал коррелятора соответствует по форме сигналу, отраженному от цели. Для уменьшения влияния боковых лепестков приемной антенны принимают различные конструктивные меры [11].

Кроме того, применяют специальную обработку принятого сигнала [12], что в совокупности позволяет свести до минимума помехи, обусловленные сигналом прямого прохождения, и обеспечить учет эффекта Допплера. Для определения формы опорного сигнала коррелятора можно использовать хорошо отработанные существующие навигационные приемники, позволяющие практически безошибочно детектировать принятые сигналы спутниковой навигации.

Заключение

Таким образом, использование сигналов спутниковых навигационных систем представляется вполне возможным для применения в качестве сигнала подсвета в радиолокационных станциях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы современной радиолокации и обработки сигналов / Р.П. Быстров, Е.В. Кузнецов, А.В. Соколов, Ю.С. Чесноков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 9. – С. 11–26.
2. **Бакулев П.А.** Радиолокационные системы: учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
3. Радиолокационные системы: учебник / В.П. Бердышев, Е.Н. Гарин, А.Н. Фомин [и др.]; под общ. ред. В.П. Бердышева. – Красноярск: СФУ, 2011. – 400 с.
4. **Серапинас Б.Б.** Глобальные системы позиционирования. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Каталог, 2002. – 106 с.
5. GNSS Technologies and receiver testing: application note [Electronic resource] / Keysight Technologies. – USA, 20174. – URL: https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-2288EN.pdf?id=2336881 (accessed: 06.08.2019).
6. **Черняк В.С.** Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
7. A microwave cryogenic low-noise amplifier based on SiGe heterostructure / B.I. Ivanov, M. Grajcar, I.L. Novikov, A.G. Vostretsov, E.V. Il'ichev // Technical Physics Letters. – 2016. – Vol. 42, iss. 4. – P. 380–383. – DOI: 10.1134/S1063785016040076.
8. Криогенный малошумящий усилитель для радиоастрономических наблюдений / В.Ф. Вдовин, В.Г. Грачёв, С.Ю. Дрягин, А.И. Елисеев, Р.К. Камалетдинов, Д.В. Коротаев, И.В. Леснов, М.А. Мансфельд, Е.Л. Певзнер, В.Г. Перминов, А.М. Пилипенко, Б.Д. Сапожников, В.П. Саурин // Астрофизический бюллетень. – 2016. – Т. 71, № 1. – С. 134–138.
9. **Воскресенский Д.И**. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учебное пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
10. **Охрименко А.Е.** Основы обработки и передачи информации. – Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. – 179 с.
11. **Охрименко А.Е., Пархоменко Н.Г., Семашко П.Г.** Методы подавления прямого сигнала в радиолокаторах с подсветом от широковещательных передатчиков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16, № 5. – С. 77.
12. **Богданович В.А., Вострецов А.Г., Стенюков Н.С.** Инвариантные алгоритмы обнаружения сигналов в радиолокаторах с цифровым телевизионным подсветом // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 4. – С. 411–418. – DOI: 10.7868/S0033849415030079.

ABOUT THE POSSIBILITY OF USING SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS AS ILLUMINATION SIGNALS IN PASSIVE RADAR STATIONS

Kozlov I.N.[1], Vostretsov A.G.[1,2]
[1]*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[2]*Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

In this paper we have considered the use of satellite navigation systems illumination signals in passive radars stations. The method of simulation modeling obtained an estimates of the energy parameters of satellite signals, calculated the geometric dimensions of the receiving antenna, the accumulation time, and were formed criteria for determination range and altitude of the target for its detection with a given signal-to-noise ratio

Keywords: navigation systems, signal-to-noise ratio, illumination signals, passive radar station.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-27-37

REFERENCES

1. Bystrov R.P., Kuznetsov E.V., Sokolov A.V., Chesnokov Yu.S. Metody sovremennoi radiolokatsii i obrabotki signalov [Methods of modern radar and signal processing]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki – Achievements of Modern Radioelectronics*, 2005, no. 9, pp. 11–26.
2. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p.
3. Berdyshev V.P., ed. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar systems]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2011. 400 p.
4. Serapinas B.B. *Global'nye sistemy pozitsionirovaniya* [Global positioning systems]. 3rd ed. Moscow, Katalog Publ., 2002. 106 p.
5. Keysight Technologies. *GNSS Technologies and receiver testing: application note*. Available at: https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-2288EN.pdf?id=2336881 (accessed 06.08.2019).
6. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multistation radiolocation]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 416 p.
7. Ivanov B.I., Grajcar M., Novikov I.L., Vostretsov A.G., Il'ichev E.V. A microwave cryogenic low-noise amplifier based on SiGe heterostructure. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, iss. 4, pp. 380–383. DOI: 10.1134/S1063785016040076.
8. Vdovin V.F., Grachev V.G., Dryagin S.Yu., Eliseev A.I., Korotaev D.V., Lesnov I.V., Mansfeld M.A., Pevzner E.L., Perminov V.G., Kamaletdinov R.K., Sapozhnikov B.D., Saurin V.P., Pilipenko A.M. Kriogennyi maloshumyashchii usilitel' dlya radioastronomicheskikh nablyudenii [Cryogenically cooled low-noise amplifier for radio-astronomical observations and centimeter-wave deep-space communications systems]. *Astrofizicheskii byulleten' – Astrophysical Bulletin*, 2016, vol. 71, no. 1, pp. 134–138. (In Russian).
9. Voskresenskii D.I. *Ustroistva SVCh i antenny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* [Microwave devices and antennas. Phased array design]. 4th ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 744 p.
10. Okhrimenko A.E. *Osnovy obrabotki i peredachi informatsii* [Fundamentals of information processing and transmission]. Minsk, MVIZRU PVO Publ., 1990. 179 p.
11. Okhrimenko A.E., Parkhomenko N.G., Semashko P.G. Metody podavleniya pryamogo signala v radiolokatorakh s podsvetom ot shirokoveshchatel'nykh peredatchikov [Direct path interference suppression methods for semiactive radars operating with broadcast transmitters]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy – Electromagnetic waves and electronic systems*, 2011, vol. 16, no. 5, p. 77.
12. Bogdanovich V.A., A.G. Vostretsov, Stenyukov N.S. Invariantnye algoritmy obnaruzheniya signalov v radiolokatorakh s tsifrovym televizionnym podsvetom [Invariant algorithms for signal detection in radar systems with digital television illumination]. *Radiotekhnika i elektronika – Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 411–418. DOI: 10.7868/S0033849415030079. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлов Илья Николаевич – родился в 1992 году, аспирант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Основное направление научных интересов – методы и средства моделирования и натурного эксперимента в системах обнаружения и оценивания параметров сигналов. Опубликовано 2 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ikozlov92.06@gmail.com).

Kozlov Ilya Nikolaevich (b. 1992) – a postgraduate student department of construction and technology of radio-electronic devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on methods and tools for modeling and full scale experiment in systems for detecting and estimating the signal parameters. He is author of 2 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ikozlov92.06@gmail.com).

Вострецов Алексей Геннадьевич – родился в 1955 году, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теория устойчивого обнаружения, различения и оценки сигналов в условиях априорной неопределенности. Опубликовано свыше 150 научных работ, в том числе 3 монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostreczov@adm.nstu.ru).

Vostretsov Aleksey Gennadievich (b. 1955) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, vice-rector for scientific work at the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the theory of stable detection, differentiation and estimation of signals under condition of a priori uncertainty. He is the author more than 150 publications including 3 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vostreczov@adm.nstu.ru).

Статья поступила 22 апреля 2019 г.
Received April 22, 2019

To Reference:

Kozlov I.N., Vostretsov A.G. O vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovykh navigatsionnykh sistem v kachestve signalov podsveta v passivnykh radiolokatsionnykh stantsiyakh [About the possibility of using satellite navigation systems as illumination signals in passive radar stations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 27–37. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-27-37.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2019 апрель–июнь № 2 (43)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 62-643;536.463

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАМЕНИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПАРОВОЙ СТРУЕЙ

Е.П. Копьев [1], И.С. Ануфриев [1,2], Е.Ю. Шадрин [1], Е.Л. Лобода [3,4], М.В. Агафонцев [3,4], М.А. Мухина [1]

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*
[2]*Новосибирский государственный технический университет*
[3]*Томский государственный университет*
[4]*Иститут оптики атмосферы СО РАН*

В данной работе на примере дизельного топлива проведены тепловизионные и термопарные измерения во внешнем факеле перспективного горелочного устройства с распылением струей перегретого водяного пара. Эксперименты проведены в широком диапазоне изменения режимных параметров (расход и температура пара и расход топлива). В измерениях использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB и платинородий-платинородиевая термопара типа B. Получены мгновенные и средние поля температуры. Установлена зависимость эффективного коэффициента излучения пламени от расхода перегретого водяного пара и топлива. Выявлено влияние параметров работы устройства на температуру во внешнем факеле горелки. С увеличением расхода пара температура факела понижается, что препятствует образованию термических оксидов азота. И наоборот, с повышением расхода топлива увеличиваются размеры факела, что приводит к образованию высокотемпературных областей в факеле, способствующих образованию NO_x. Получено хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термопарными данными. Полученные данные могут быть использованы для численного моделирования исследуемого процесса горения.

Ключевые слова: горелочное устройство, горение жидких углеводородов, распыление топлива, сжигание в присутствии перегретого водяного пара, температура пламени, ИК-термография, термопарные измерения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-38-55

Введение

Вода (или пар) уже давно используется в целях снижения тепловой нагрузки и подавления детонации в камерах сгорания, обеспечения диспергирования тяжелых топлив [1] и создания водо-топливных эмульсий [2–4]. Использование воды является известным способом снижения концентрации NO_x [5–7]. В некоторых работах [8–10] считают, что такое снижение эмиссии NO_x заключается в снижении температуры и ламинарной скорости пламени благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси при наличии водяного пара. К тому же при добавлении воды наблюдается увеличение времени задержки воспламенения [11]. Несмотря на очевидные достоинства применения воды и водяного пара на практике в тепловых машинах [12], некоторые авторы также утверждают, что помимо тепловой нагрузки присутствие водяного пара может оказывать эффект на протекание химических реакций в процессе горения [11, 13]. В частности, отмечается, что при-

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-38-50001-мол_нр).

© 2019 Е.П. Копьев, И.С. Ануфриев, Е.Ю. Шадрин, Е.Л. Лобода, М.В. Агафонцев, М.А. Мухина

сутствие воды способствует образованию дополнительных радикалов OH [14, 15], которые активно участвуют в окислении как частиц сажи [16], так и монооксида углерода [17].

Основываясь на данных преимуществах, нами предложен способ сжигания жидкого углеводородного топлива в потоке перегретого водяного пара [18–20], при котором происходит газификация углеродсодержащих частиц неполного сгорания жидких углеводородов. На горелочных устройствах испарительного типа было показано [18, 20] существенное влияние водяного пара на основные характеристики процесса. Указанный способ сжигания обеспечивает устойчивое воспламенение, высокую полноту сгорания топлива и низкое содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания. Этот подход является перспективным для экологически безопасной утилизации низкокачественных жидких углеводородных топлив и горючих производственных отходов с получением тепловой энергии.

На основе данного принципа предложено горелочное устройство, реализующее перспективный способ распыла жидкого углеводородного топлива струей перегретого водяного пара [21]. Преимуществом данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар предварительно не смешаны друг с другом: пар подается из форсунки в виде струи, на которую натекает распыляемое жидкое топливо [22]. Такой способ исключает проблему коксования и засорения каналов подачи топлива, что улучшает эксплуатационные характеристики и надежность горелочного устройства, и позволяет сжигать загрязненное топливо и горючие жидкие отходы. При этом водяной пар играет и роль окислителя в реагирующей смеси, замещающего кислород воздуха. Для обоснования закономерностей влияния параметров струи водяного пара на основные характеристики процесса горения жидких углеводородов (состав продуктов сгорания и удельная мощность тепловыделения) необходимы экспериментальные исследования, в частности температура факела.

Наиболее распространенным средством измерения температуры пламени является термопара. Однако она позволяет получить лишь локальные, усредненные по времени значения температуры, чего во многих случаях недостаточно для понимания отдельных процессов. В работе [23] для расширения пространственного и временного диапазона измерений предлагается использовать инфракрасные камеры. Такие камеры (тепловизоры) могут использоваться для решения различных задач, например, для изучения разрушения материала под действием температуры [24–28], определения jet fire radiation [29–30], pool fire radiation [31–32], thermal radiation of fire whirl [33], fireballs [34], определения скорости испарения топливных капель [35] и т. п. Следует отметить, что инфракрасная термографическая камера регистрирует излучение от объекта. В зависимости от типа камеры полученные показания преобразовываются в значения температуры, при этом для преобразования сигнала используется либо известный коэффициент излучения, либо он измеряется экспериментально [31]. Для получения значения этого параметра можно использовать различные процедуры, при этом само значение в дальнейшем обычно принимают за постоянное по всей поверхности пламени [29]. Одним из таких методов является измерение температуры в точке пламени любым контактным методом, например, при помощи термопары [31]. Измеряя температуру в этой же точке при помощи тепловизора, подбираются такие значения коэффициента излучения, чтобы значение температуры, выдаваемое тепловизором, совпадало с измерением термопары. Кроме того, для правильного расчета температуры необходимо учитывать следующие параметры: расстояние между камерой и измеряемым объектом, температуру окружающей среды, отно-

сительную влажность, так как все они связаны с передачей излучения через окружающую среду, которая разделяет излучающий объект и измерительное оборудование (ИК-камеру) [23, 36].

Следует отметить, что в работе [29] не указаны ни модель применяемой ИК-камеры, ни рабочий спектральный интервал, но делается вывод о том, что в vertical jet fires имеется зависимость коэффициента излучения пламени от расстояния между ИК-камерой и пламенем и от зоны горения, при этом пламя условно разделено на три участка. В работах [31, 34] для измерений применяются ИК-камеры длинноволнового ИК-диапазона, выбор которых может быть обусловлен наличием большой концентрацией сажи в объекте исследования [34]. В [33] приведены результаты исследования процесса горения в средневолновом ИК-диапазоне с рабочим спектральным интервалом ИК-камеры 3–5 мкм, это привело к тому, что у авторов получился существенный разброс коэффициента излучения по высоте пламени (различие более 60 %), что обусловлено разной толщиной пламени, которая влияла на вклад излучения сажи, а также в этот спектральный интервал попадает излучение CO и CO_2, интенсивность излучения которых превышает интенсивность излучения абсолютно черного тела, по которому калибруются ИК-камеры [37].

Основной вклад в излучение пламени вносят горячие газы CO_2 и H_2O, а также твердые частицы сажи [38–39]. Горячие газы испускают излучение в определенных полосах инфракрасного спектра. Наиболее предпочтительные спектральные интервалы для измерения поля температуры в пламени с применением термографии на основе анализа спектров излучения пламени представлены в [37], а в [40] представлены некоторые практические результаты измерения характеристик пламени в ряде узких спектральных интервалов средневолнового ИК-диапазона.

В данной работе проведены исследования температуры факела перспективного горелочного устройства при сжигании дизельного топлива с распылением топлива струей перегретого водяного пара в широком диапазоне изменения режимных параметров. Измерения произведены в узком спектральном интервале средневолнового ИК-диапазона.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Для изучения тепловых характеристик пламени использовалось горелочное устройство, которое показано на рис. 1. Горелка реализует предложенный способ диспергирования и сжигания, при котором происходит паровая газификация продуктов термического разложения и неполного сгорания жидкого топлива [20]. Конструкция лабораторного образца прямоточной горелки выбрана из соображений устойчивого воспламенения распыленного топлива в камере сгорания с последующей газификацией и дожиганием во внешнем факеле.

Основными элементами горелки являются: камера газогенерации; паровая форсунка, соединенная с внешним парогенератором; трубка для подачи топлива, расположенная вблизи выходного отверстия паровой форсунки; выходное сопло. Внешний диметр горелки 60 мм, высота 140 мм, диаметр выходного отверстия горелки 25 мм. Размеры обеспечивают мощность горелочного устройства, необходимую и достаточную для проведения исследований в лабораторных условиях. В камере газогенерации имеются отверстия для притока воздуха из атмосферы. Паровая форсунка (выходной диаметр 0,6 мм) установлена вертикально в основании камеры газогенерации. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар предварительно не смешаны друг с другом, что на практике является важным преимуществом, поскольку нет контакта топлива с форсункой, не происходит коксование ее

поверхностей и засорение каналов с последующими сбоями в работе горелочного устройства. Кроме того, на верхнем торце корпуса установлено сопло в виде крышки с отверстием по центру для образования зоны рециркуляции, формируемой парами легкоиспаряющихся фракций жидкого топлива, способных легко воспламеняться при пуске и стабилизировать воспламенение паромасляной струи при работе устройства. Топливо подается в топливоприемник через топливопровод, по которому стекает естественным способом в основание газовой струи тонкой струей. Стабильный расход топлива задается топливной форсункой и насосом и контролируется при помощи электронных весов.

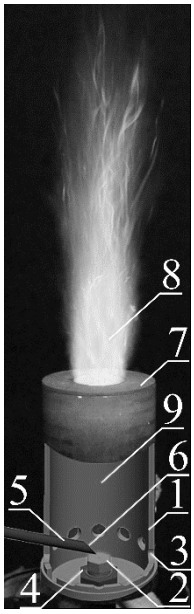


Рис. 1 – Горелочное устройство:

1 – цилиндрический корпус; *2* – паровая форсунка; *3* – воздухоподводящие отверстия; *4* – паропровод; *5* – топливоподающая трубка; *6* – скос; *7* – сопло; *8* – факел; *9* – зона рециркуляции

Fig. 1 – Burner:

1 – cylindrical casing; *2* – steam nozzle; *3* – air-supplying holes; *4* – steam line; *5* – fuel pipeline; *6* – chamfer; *7* – nozzle; *8* – flame; *9* – recirculation zone

Схема процесса в горелочном устройстве следующая. В паровую форсунку из парогенератора поступает перегретый водяной пар, который истекает из форсунки и формирует высокоскоростную струю. В основание паровой струи из топливоподающей трубки натекает тонкой струей жидкое топливо, которое при взаимодействии фаз распыляется и формируется устойчивый мелкодисперсный газокапельный поток. Кроме диспергирования топлива, обеспечивается его нагрев и испарение с последующей газификацией и сжиганием образующихся продуктов реакции во внешнем факеле устройства. Предложенная конструкция горелочного устройства обеспечивает возможность сжигания загрязненных, в том числе механическими примесями и водой, некондиционных жидких углеводородов, таких как отработанное масло, отходы нефтедобычи и нефтепереработки, с высокой энергоэффективностью и низкими показателями токсичных выбросов в атмосферу.

Измерение температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства при сжигании дизельного топлива с распылением струей перегретого водяного пара проводилось на основе ИК-метода диагностики пламени. Данный метод является бесконтактным и обладает, как отмечалось выше, рядом преимуществ по сравнению с контактными методами: во-первых, не вносит возмущений в структуру пламени (характерных для термопар); во-вторых, дает возможность одновременной регистрации сразу всего поля температуры, что особенно важно при исследованиях нестационарных процессов; в-третьих, позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением, что обеспечивает возможность регистрации пульсаций температуры в турбулентном факеле.

Для измерения температуры использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB. Данный прибор имеет высокое временное разрешение: частота кадров до 177 Гц при максимальном разрешении 320 × 240 пикселей и до 18 кГц при разрешении 320 × 4 пикселей. Минимальное время экспозиции кадра 6 мкс. Рабочий диапазон тепловизора находится в среднем ИК-диапазоне 2,5–5,0 мкм. В этом же спектральном диапазоне находятся мощные линии излучения пламени, обусловленные излучением горячих продуктов горения (в том числе – паров воды, CO_2, CO). Для работы был выбран узкополосный дисперсионный оптический фильтр F0616 с полосой пропускания 2,5–2,7 мкм. Выбор фильтра обусловлен наличием мощных линий излучения продуктов горения в этом спектральном интервале [37]. Диапазон измерения температур тепловизора определяется калибровками и составляет 583–1773 К для выбранного фильтра. Для получения среднего значения температуры в данной работе измерения проводились с частотой 60 Гц в течение 20 с.

Для определения эффективного коэффициента излучения одновременно с измерениями тепловизором в контрольных точках (на оси горелочного устройства r = 0, на высоте x = 100 мм от среза горелки) регистрировалась температура с помощью платинородий-платинородиевой термопары типа B (Pt – 30 %, Rh / Pt – 6 %, Rh), диапазон измеряемых темератур 600–1600 °C (кратковременно до 1800 °C), диаметр проволоки 300 мкм, длина термоэлектродов 70 см. Характерное время релаксации 5 с. Термоэлектроды защищены газонепроницаемым керамическим чехлом TRA-116316 (Al2O3 99 %, до 1900 °C) с диаметром 5 мм. Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от номинальных статических характеристик преобразователя 0,5 % от значения измеряемой температуры. По полученным данным на средней по времени термограмме определялось среднее значение температуры в области расположения спая.

Следует отметить, что факел представляет собой полупрозрачную трехмерную оптическую среду, поэтому тепловизор регистрирует интегральное излучение от всех внутренних слоев среды, по значению которого, с использованием калибровок и эффективного коэффициента излучения, определяется температура в плоскости наблюдений (в плоскости симметрии горелочного устройства).

Для оценки достоверности полученных тепловизионных данных были проведены измерения средней температуры в высокотемпературном факеле горелочного устройства вдоль его оси при помощи термопары, используемой для определения эффективного коэффициента излучения. Рабочий конец термопары помещался в различные точки внутри факела при помощи координатно-перемещающего устройства (КПУ).

2. Результаты измерений и их анализ

Экспериментальные исследования проведены для различных режимов работы горелочного устройства: расход топлива F_f менялся в диапазоне от 0,4 до 2,2 кг/ч, а расход пара F_v – от 0,2 до 1,4 кг/ч. Также варьировалась и температура перегретого водяного пара T_s в диапазоне 150…550 °C. При этом относительный массовый расход пара $\gamma = F_v/F_f$ изменялся от 0,2 до 1,0. Выбранный диапазон режимных параметров соответствует проведенным ранее исследованиям тепловыделения и экологических характеристик горения [21].

Для характерного режима горения при постоянных расходах пара F_v = 0,6 кг/ч и топлива F_f = 1,0 кг/ч изучено влияние температуры пара на распределение температуры в факеле (рис. 2).

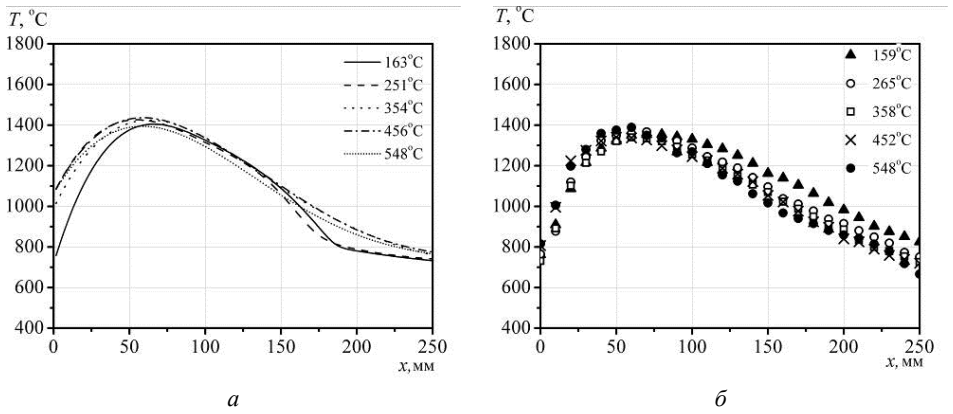


Рис. 2 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки при различной температуре пара T_s (°C) и постоянных расходах пара F_v = 0,6 кг/ч и топлива F_f = 1,0 кг/ч:

а – измерения тепловизором; *б* – термопарные измерения

Fig. 2 – Distribution of the time-average flame temperature T over the burner vertical axis at different steam temperature T_s (°C) and constant steam and fuel mass flow rates F_v = 0,6 kg/h and F_f=1.0 kg/h according to measurements with:

a – thermal imaging camera and *b* – thermocouple

Анализ результатов (рис. 2) показывает, что температура перегретого водяного пара слабо влияет на распределение средней температуры в факеле. По мнению авторов, это может быть связано с тем, что при адиабатическом расширении паровой струи, истекающей из форсунки, ее температура в камере газогенерации резко снижается и при прохождении расстояния от среза паровой форсунки до зоны воспламенения (~60 мм) достигает примерно одного значения для разной начальной температуры пара. Другим объяснением этого может быть то, что температура в камере газогенерации намного больше температуры пара. Поэтому за счет конвективного и лучистого теплопереноса температура паровой струи в зоне воспламенения зависит уже от граничных условий. Наблюдается хорошее соответствие полученных результатов при помощи тепловизора (рис. 2, *а*) и термопары (рис. 2, *б*), что указывает на правильный выбор коэффициента излучения для тепловизионных исследований. Максимальная температура в факеле достигает 1400 °C.

Похожая закономерность установлена и авторами в [21], где обнаружено, что температура пара не влияет на состав отработанных газов в исследуемом горелочном устройстве, поэтому дальнейшие исследования проведены при постоянной температуре пара T_s = (260 ± 10) °C, обеспечивающей достаточный перегрев пара для протекания реакции и в то же время с минимальными затратами энергии на перегрев.

На рис. 3 показаны зависимости давления пара и мощности горелки от режимных параметров. С увеличением расхода пара наблюдается увеличение давления в парогенераторе при одновременном снижении степени перегрева пара $T_s - T_b$ (рис. 3, *а*). Рассчитанная мощность горелочного устройства зависит только от расхода топлива, за исключением отдельных режимов, связанных с неполным сгоранием топлива (рис. 3, *б*).

На рис. 4, *а* показана зависимость высоты факела горелки от режимов подачи топлива и перегретого пара. Длина факела (характерный продольный размер светящейся зоны) в каждом режиме измерялась визуально по серии фотографий

в последовательные моменты времени. Средняя по времени длина факела изменяется от 0,1 до 0,5 м при увеличении F_f от 0,4 до 2,2 кг/ч. С ростом расхода пара (при постоянном расходе топлива) размер факела уменьшается, что связано с увеличением импульса струи (силой реакции струи) при повышении давления в парогенераторе. С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара), наоборот, размер факела увеличивается.

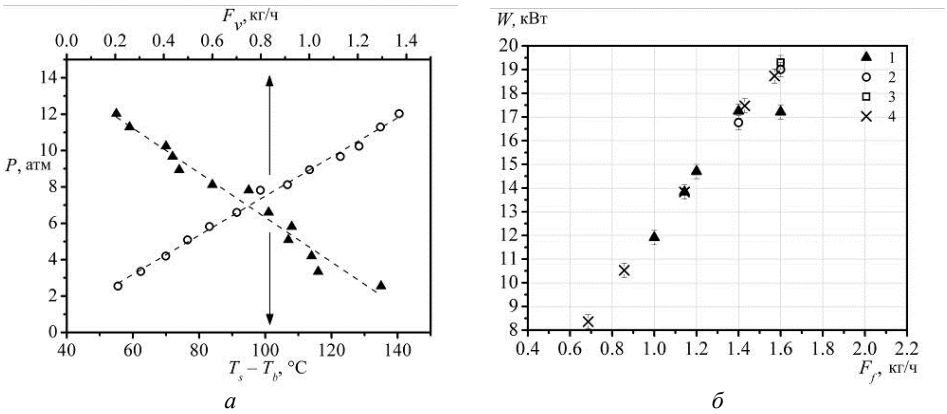


Рис. 3 – Зависимость давления в парогенераторе P от степени перегрева пара ($T_s - T_b$) и от расхода воды (пара) F_v (*а*); измеренная тепловая мощность горелочного устройства для разных расходов топлива (*б*):

1 – F_v = 0,8 кг/ч; *2* – F_v = 1,2 кг/ч; *3* – F_v = 1,4 кг/ч; *4* – γ = 0,7; T_s = (260 ± 10) °C

Fig. 3 – Pressure in the steam generator P as a function of the degree of steam superheat ($T_s - T_b$) and water (vapor) mass flow rate F_v (*a*); thermal power of the burner measured at different fuel mass flow rate (*b*):

1 – F_v = 0,8 kg/h; *2* – F_v = 1,2 kg/h; *3* – F_v = 1,4 kg/h; *4* – γ = 0,7; T_s = (260 ± 10) °C

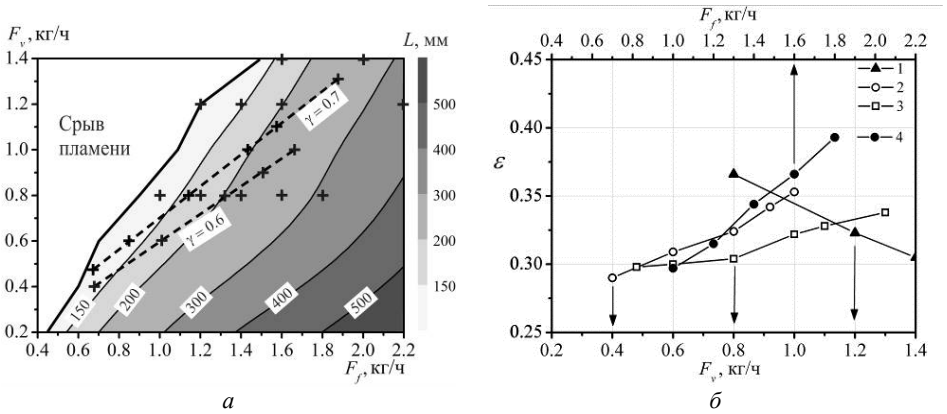


Рис. 4 – Зависимость высоты (мм) факела горелки от режимов подачи топлива и перегретого пара при сжигании дизельного топлива; символами «+» отмечены режимы, рассматриваемые в настоящей работе (*а*); коэффициент излучения пламени ε (*б*):

1 – F_f = 1,6 кг/ч; *2* – γ = 0,6; *3* – γ = 0,7; *4* – F_v = 0,8 кг/ч; T_s = (260 ± 10) °C

Fig. 4 –Burner flame height (mm) versus fuel and superheated steam supply modes during diesel fuel combustion; «+» designates the modes considered in this work (*a*); flame emissivity ε (*b*):

1 – F_f = 1,6 kg/h; *2* – γ = 0,6; *3* – γ = 0,7; *4* – F_v = 0,8 kg/h; T_s = (260 ± 10) °C

На рис. 4, *б* показаны зависимости коэффициента излучения пламени ε от режимных параметров горелки, который находится в диапазоне ε = 0,3–0,4. Видно, что при увеличении расхода пара (для постоянного расхода топлива) значение ε снижается, в то же время с увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара) коэффициент излучения увеличивается. С одной стороны, это может быть связано с режимами работы горелки и зависит от концентрации перегретого водяного пара в смеси с топливом – при большем содержании пара, коэффициент излучения ниже. С другой стороны, незначительное изменение коэффициента излучения (ε = 0,3–0,4) связано с тем, что в рабочем спектральном интервале 2,5–2,7 мкм помимо газообразных продуктов горения присутствуют частицы сажи, концентрация которых напрямую зависит от полноты сгорания топлива. Влияние концентрации частиц сажи на коэффициент излучения пламени рассматривается в работах [33, 39], а в предельных случаях, когда для измерений используется широкий спектральный интервал или ИК-камеры длинноволнового спектрального диапазона, для пламен с большим содержанием твердых углеродных частиц, коэффициент излучения приближается к единице [34]. Следует отметить, что в условиях экспериментов, представленных в данной статье, увеличение расхода перегретого пара приводит к увеличению полноты сгорания топлива и соответственно снижению концентрации сажи, а увеличение расхода топлива приводит к снижению полноты сгорания и увеличению концентрации частиц сажи в пламени [21]. Это является объяснением полученной зависимости коэффициента излучения от режимов работы горелки. При постоянном относительном расходе пара γ коэффициент излучения ε почти не зависит от расхода пара и топлива (Δε ~ 0,03).

На рис. 5 представлены результаты экспериментов в факеле горелочного устройства для характерного режима при F_v = 0,8 кг/ч и F_f = 1,2 кг/ч. Фотография факела (рис. 5, *а*) и поле мгновенной температуры (рис. 5, *б*) демонстрируют существенно турбулентную структуру факела. Осредненное по 1200 мгновенным термограммам поле температуры показано на рис. 5, *в*. Видно, что изотермы имеют коническую форму характерную для диффузионного режима горения. Это означает, что выходящий из горелки поток содержит непрореагировавшие компоненты, которые догорают по мере поступления окислителя из окружающей атмосферы. На рис. 5, *д* показаны профили температуры в поперечном сечении факела на разной высоте. Видно хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термопарными данными.

Увеличение расхода пара (при постоянном расходе топлива) приводит к снижению температуры пламени (рис. 6), максимальная температура снижается более чем на 200 °С. Данный эффект является по мнению авторов основной из причин подавления производства NO_x в присутствии перегретого водяного пара благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси [21].

С увеличением расхода топлива (при постоянном расходе пара) область максимальной температуры сдвигается от среза горелки (рис. 7), что связано с увеличением мощности и, следовательно, размеров факела (рис. 4, *а*). Помимо этого увеличиваются и размеры высокотемпературной области внутри факела (профиль температуры становится шире), способствующей производству термических оксидов азота [21]. В среднем для исследуемых режимов максимальная температура в факеле находится на уровне 1350 °С.

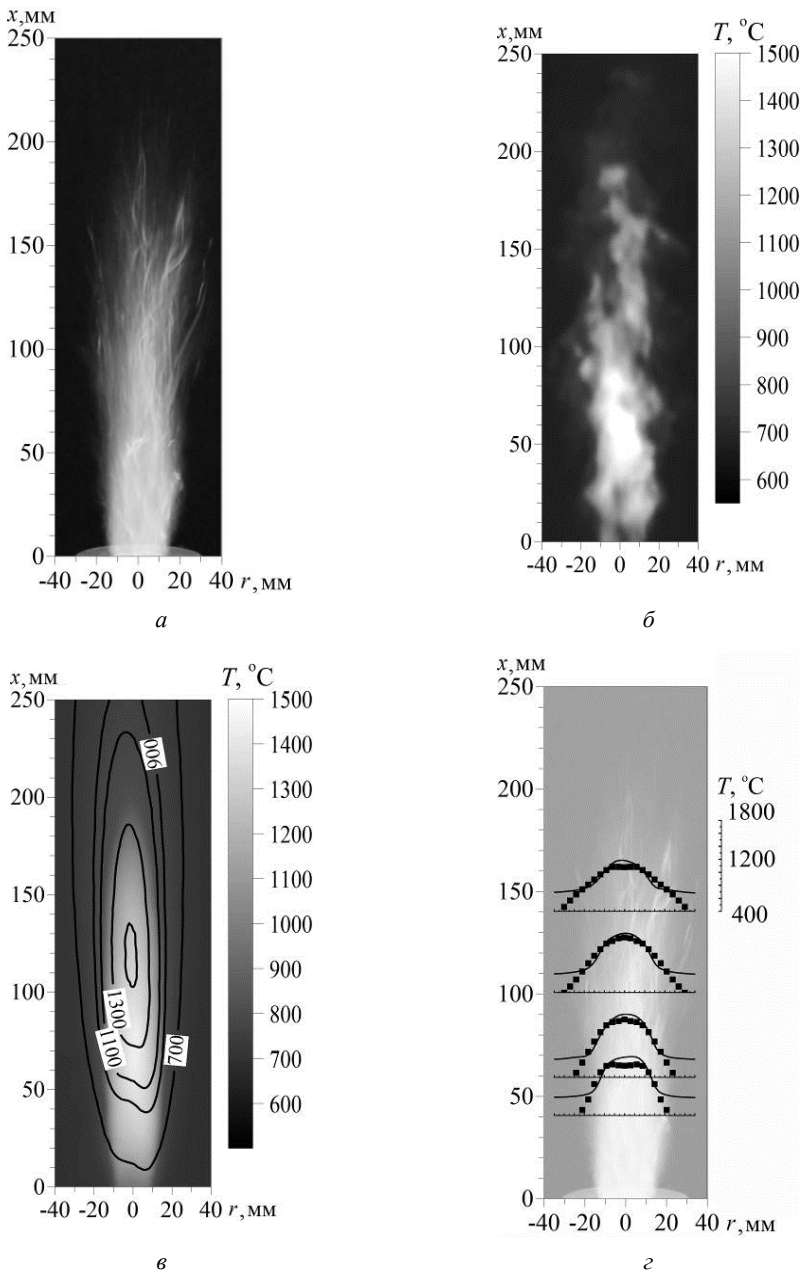
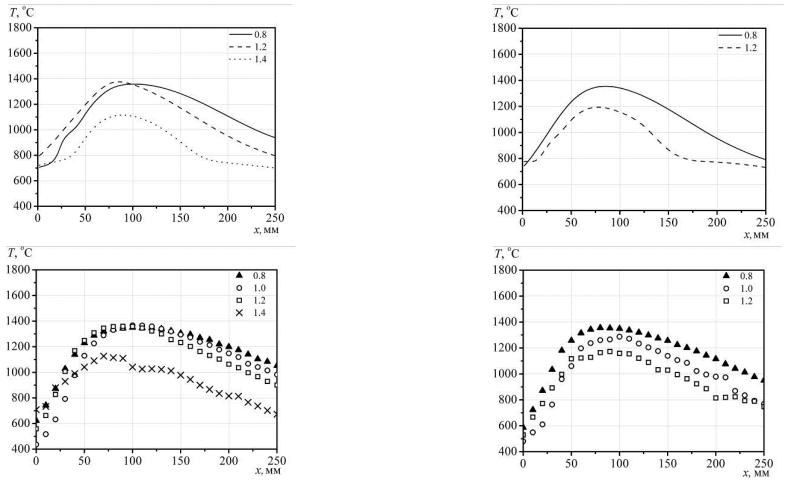


Рис. 5 – Результаты экспериментов при F_v = 0,8 кг/ч и F_f = 1,2 кг/ч (T_s = (260 ± 10) °C):

а – фотография внешнего факела; *б* – поле мгновенной температуры; *в* – поле средней температуры; *г* – профили средней температуры на различной высоте факела («–» – измерения тепловизором, □ – измерения термопарой)

Fig. 5 – Experimental results at F_v = 0,8 kg/h and F_f = 1,2 kg/h and T_s = (260 ± 10)°C:

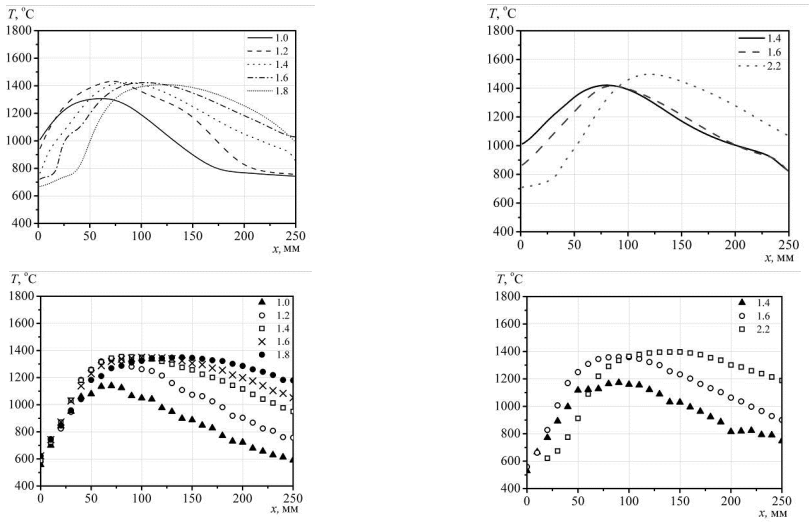
a – external flame; *b* – instantaneous temperature field; *c* – average temperature field; *d* – average temperature profiles at different flame altitude («–» corresponds to the IR thermography data, and □, to thermocouple measurements)



а *б*

Рис. 6 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки (T_s = (260 ± 10) °C) для различных расходов пара F_v (кг/ч) при постоянном расходе топлива F_f = 1,6 кг/ч (*а*) и F_f = 14 кг/ч (*б*); сверху – тепловизионные измерения; снизу – термопарные

Fig. 6 – Distribution of the time-average temperature T in the flame over the burner vertical axis (T_s = (260 ± 10)°C) at different steam mass flow rates F_v (kg/h) and the constant fuel mass flow rate (a) F_f = 1.6 and 1.4 kg/h(b); the IR thermography results are on the top, and thermocouple data, at the bottom

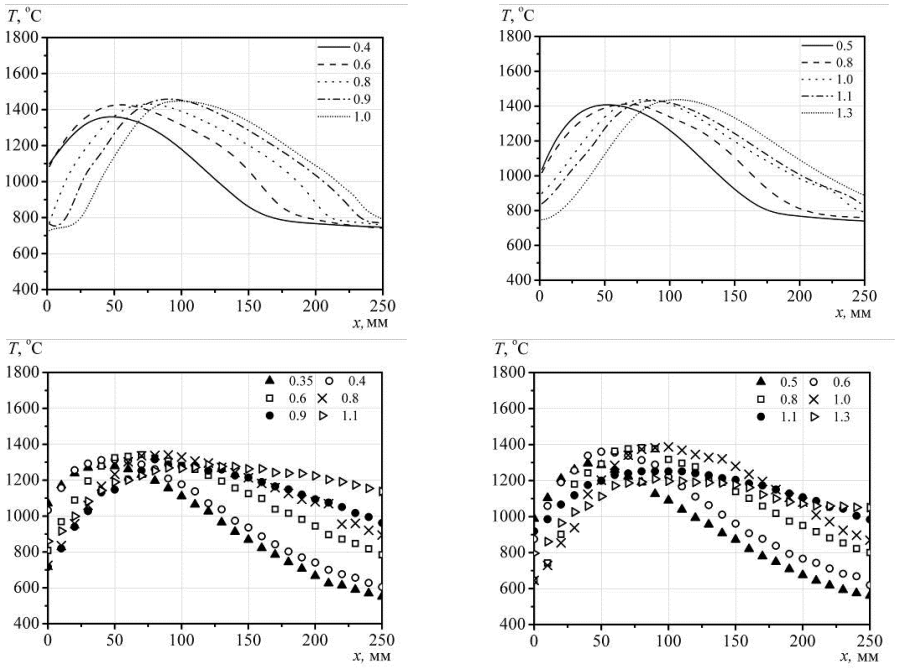


а *б*

Рис. 7 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки (T_s = (260 ± 10) °C) для различных расходов топлива F_f (кг/ч) при постоянном расходе пара F_v = 0,8 кг/ч (*а*) и F_v = 1,2 кг/ч (*б*), сверху – тепловизионные измерения, снизу – термопарные

Fig. 7 – Distribution of the time-average flame temperature T over the burner vertical axis (T_s = (260 ± 10)°C) at different fuel mass flow rate F_f under the constant steam mass flow rate (*a*) F_v = 0,8 and 1,2 kg/h (*b*); the IR thermography results are on the top, and thermocouple data, at the bottom

Похожие зависимости температуры внешнего факела наблюдаются при постоянном параметре γ: с изменением расхода пара изменяются и размеры факела (рис. 4, *а*), и профиль температуры, максимальная температура факела, достигающая 1420 °С (рис. 8). Для всех исследованных режимов наблюдается хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термопарными данными.



а *б*

Рис. 8 – Распределение средней во времени температуры T в факеле вдоль вертикальной оси горелки (T_s = (260 ± 10) °С) для различных расходов пара F_v (кг/ч) при постоянном относительном расходе пара γ = 0,6 (*а*) и γ = 0,7 (*б*), сверху – тепловизионные измерения, снизу – термопарные

Fig. 8 – Distribution of the time-average flame temperature T over the burner vertical axis (T_s = (260 ± 10) °C) at different steam mass flow rate F_v under the constant steam mass-flow ratio: (*a*) γ = 0,6 and (*b*) 0,7; the IR thermography results are on the top, and thermocouple data, at the bottom

Заключение

В данной работе на примере дизельного топлива проведены тепловизионные и термопарные измерения температуры во внешнем факеле перспективного горелочного устройства с распылением жидкого топлива струей перегретого водяного пара. Эксперименты проведены для различных режимов работы горелочного устройства: расход топлива изменялся в диапазоне 0,4–2,2 кг/ч, расход пара – в диапазоне 0,2–1,4 кг/ч, температура перегретого водяного пара – в диапазоне 150–550 °С. При этом мощность горелки варьировалась в диапазоне 8–10 кВт. Длина факела в исследуемых режимах составляла 0,1–0,5 м

В экспериментах использовалась тепловизионная камера фирмы FLIR специальной серии JADE J530SB с оптическим фильтром 2,5–2,7 мкм и заданной частотой съемки 60 Гц. Получены поля мгновенной температуры, демонстрирующие существенно турбулентную структуру факела. Поля средней скорости имеют изо-

термы конической формы, характерные для диффузионного режима горения. Это означает, что выходящий из горелки поток содержит непрореагировавшие компоненты, которые догорают по мере поступления окислителя из окружающей атмосферы. С помощью платинородий-платинородиевой термопары получены профили средней во времени температуры вдоль вертикальной оси горелки.

Установлено, что температура перегретого водяного пара слабо влияет на изменение средней температуры в факеле, поэтому результаты получены для постоянной температуры перегретого пара 260 °С. Получены зависимости коэффициента излучения, который находится в диапазоне $\varepsilon = 0{,}3–0{,}4$ и зависит от полноты сгорания топлива и концентрации сажи в пламени. Увеличение расхода пара (при постоянном расходе топлива) приводит к снижению температуры пламени, максимальная температура снижается более чем на 200 градусов. Данный эффект является по мнению авторов основной причиной подавления производства NO_x в присутствии перегретого водяного пара благодаря увеличению теплоемкости горючей смеси. И наоборот, с повышением расхода топлива увеличиваются размеры факела, что приводит к образованию высокотемпературных областей в факеле, способствующих образованию NO_x. Максимальная температура в факеле достигает 1440 °С.

Получено хорошее согласование результатов тепловизионных измерений с термопарными данными. Полученные результаты востребованы для анализа результатов измерений газового состава продуктов сгорания и тепловыделения с целью научного обоснования энергоэффективных и экологически безопасных способов утилизации некондиционных жидких углеводородов с получением тепловой энергии, а также верификации математической модели и численного моделирования процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ballester J.M., Fueyo N., Dopazo C.** Combustion characteristics of heavy oil-water // Fuel. – 1996. – Vol. 75. – P. 695–705. – DOI: 10.1016/0016-2361(95)00309-6.
2. Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants / M. Nadeem, C. Rangkuti, K. Anuar, M.R.U. Haq, I.B. Tan, S.S. Shah // Fuel. – 2016. – Vol. 85. – P. 2111–2119. – DOI: 10.1016/j.fuel.2006.03.013.
3. **Samec N., Kegl B., Dibble R.W.** Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine // Fuel. – 2002. – Vol. 81. – P. 2035–2044. – DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00135-7.
4. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel / O. Armas, R. Ballesteros, F.J. Martos, J.R. Agudelo // Fuel. – 2005. – Vol. 84. – P. 1011–1018. – DOI: 10.1016/j.fuel.2004.11.015.
5. **Dryer F.L.** Water addition to practical combustion systems – Concepts and applications // Symposium (International) on Combustion. – 1977. – Vol. 16, iss. 1. – P. 279–295. – DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80332-9.
6. **Watanabe H., Okazaki K.** Visualization of secondary atomization in emulsified-fuel spray flow by shadow imaging // Proceedings of the Combustion Institute. – 2013. – Vol. 34. – P. 1651–1658. – DOI: 10.1016/j.proci.2012.07.005.
7. Dissociative influence of H2O vapour/spray on lean blowoff and NOx reduction for heavily carbonaceous syngas swirling flames / D.G. Pugh, P.J. Bowen, R. March, A.P. Crayford, J. Runyon, S. Morris, A. Valera-Medina, A. Giles // Combustion and Flame. – 2017. – Vol. 177. – P. 37–38. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.11.010.
8. **Fells I., Rutherford G.** Burning velocity of methane-air flames // Combustion and Flame. – 1969. – Vol. 13. – P. 130–138. – DOI: 10.1016/0010-2180(69)90043-1.
9. **Babkin B.S., Vyun A.V.** Effect of water vapor on the normal burning velocity of a methane–air mixture at high pressures // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 1971. – Vol. 7, N. 3 – P. 339–341. – DOI: 10.1007/BF00742820.

10. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane air premixed flame: experimental and numerical analysis / T. Boushaki, Y. Dhue, L. Selle, B. Ferret, T. Poinsot // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – Vol. 37. – P. 9412–9422. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.037.
11. **Cong L., Dagaut P.** Experimental and detailed modeling study of the effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NOx // Energy and Fuels. – 2009. – Vol. 23. – P. 725–734. – DOI: 10.1021/ef800832q.
12. Analysis of water-fuel ratio variation in a gas turbine with a wet-compressor system by change in fuel composition / Y. Cadavid, A. Amell, J. Alzate, G. Bermejo, G.A. Ebratt // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2018. – Vol. 140, iss. 5. – Art. 052602. – DOI: 10.1115/1.4038137.
13. Comparative study of the influence of CO2 and H2O on the chemical structure of lean and rich methane–air flames at atmospheric pressure / A. Matynia, J.-L. Delfau, L. Pillier, C. Vovelle // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2009. – Vol. 45, N. 6 – P. 635–645. – DOI: 10.1007/s10573-009-0078-5.
14. Numerical study on flame structure and NO formation in CH4-O2-N2 counter flow diffusion flame diluted with H2O / D.-J. Hwang, J.-W. Choi, J. Park, S.-I. Keel, C.-B. Ch, D.-S. Noh // International Journal of Energy Research. – 2004. – Vol. 28. – P. 1255–1267. – DOI: 10.1002/er.1028.
15. Effect of CO_2 or H_2O addition on hydrocarbon intermediates in rich $C_2H_4/O_2/Ar$ flames / C. Renard, M. Musick, P.J. Van Tiggelen, J. Vandooren // Proceedings of European Combustion Meeting. – Orléans, France, 2003. – P. 221.
16. **Dryer F.L., Glassman I.** Combustion chemistry of chain hydrocarbons // Alternative Hydrocarbon Fuels: Combustion and Chemical Kinetics. – 1978. – Vol. 65, iss. 5. – P. 255–306. – DOI: 10.2514/5.9781600865367.0255.0306.
17. **Gottuk G.T., Roby R.J., Beyler C.L.** The role of temperature on carbon monoxide production in compartment fires // Fire Safety Journal. – 1995. – Vol. 24, iss. 4. – P. 315–331. – DOI: 10.1016/0379-7112(95)00027-5.
18. Характеристики сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37–44.
19. Исследование наночастиц сажи при горении жидких углеводородов с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара / И.С. Ануфриев, А.М. Бакланов, О.В. Боровкова, М.С. Вигриянов, В.В. Лещевич, О.В. Шарыпов // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 22–30.
20. Burning of substandard liquid hydrocarbons with steam gasification / I. Anufriev, S. Arsentyev, M. Vigriyanov, E. Kopyev, O. Sharypov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115. – Art. 03013. – DOI: 10.1051/matecconf/201711503013.
21. Combustion of sub-standard liquid hydrocarbons dispersed by a superheated steam jet / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, O.V. Sharypov, S.S. Arsentyev, Ya.A. Osintsev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1128. – Art. 012059. – DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012059.
22. **Kopyev E.P., Shadrin E.Yu.** Investigation of a promising method for liquid hydrocarbons spraying // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1105. – Art. 012092. – DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012092.
23. **Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P-A.** On the use of an infrared camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels [Electronic resource] // QIRT 2006. 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography. – Padova, Italy, 2006. – URL: http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf (accessed: 06.08.2019).
24. Infrared thermography for condition monitoring – a review / S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar // Infrared Physics and Technology. – 2013. – Vol. 60. – P. 35–55. – DOI: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.
25. **Švantner M., Vacíková P., Honner M.** IR thermography heat flux measurement in fire safety applications // Infrared Physics and Technology. – 2012. – Vol. 55. – P. 292–298. – DOI: 10.1016/j.infrared.2012.03.008.
26. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum / X.P. Ding, H.M. Li, J.Q. Zhu, G.Y. Wang, H.Z. Cao, Q. Zhang, H.L. Ma // Infrared Physics and Technology. – 2017. – Vol. 81. – P. 166–169. – DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.017.

27. Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography / M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. González-Aguilera, J. Martinez // Infrared Physics and Technology. – 2015. – Vol. 1. – P. 492–500. – DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.013.
28. Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones / E. Grinzato, S. Marinetti, P.G. Bison, M. Concas, S. Fais // Infrared Physics and Technology. – 2004. – Vol. 46, iss. 1–2. – P. 63–68. – DOI: 10.1016/j.infrared.2004.03.009.
29. Thermal radiation from vertical jet fires / A. Palacios, M. Munoz, R.M. Darbra, J. Casal // Fire Safety Journal. – 2012. – Vol. 51. – P. 93–101. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.03.006.
30. Experimental study on propane jet fire hazards: thermal radiation / B. Zhang, Y. Liu, D. Laboureur, M.S. Mannan // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2015. – Vol. 54. – P. 9251–9256. – DOI: 10.1021/acs.iecr.5b02064.
31. Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires using infrared thermography / E. Planas-Cuchi, J.M. Chatris, C. Lopez, J. Arnaldos // Fire Technology. – 2003. – Vol. 39. – P. 261–273. – DOI: 10.1023/A:1024193515227.
32. **Sudheer S., Prabhu S.V.** Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires // Nuclear Engineering and Design. – 2010. – Vol. 240, iss. 10. – P. 3474–3480. – DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.04.043.
33. An experimental study on thermal radiation of fire whirl / P. Wang, N. Liu, Y. Bai, L. Zhang, K. Satoh, X. Liu // International Journal of Wildland Fire. – 2017. – Vol. 26. – P. 693–705. – DOI: 10.1071/WF17010.
34. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera / P. Blankenhagela, K.-D. Wehrstedta, K.B. Mishrab, J. Steinbachc // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2018. – Vol. 54. – P. 246–253. – DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.008.
35. **Saha A., Kumar R., Basu S.** Infrared thermography and numerical study of vaporization characteristics of pure and blended bio-fuel droplets // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53. – P. 3862–3873. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.003.
36. **Singh P., Chander S.** Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 124. – P. 90–108. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.034.
37. **Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.** Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 124–128.
38. **Невский А.С.** Лучистый теплообмен в печах и топках. – М.: Металлургия, 1971. – 440 с.
39. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques / E. Pastor, A. Rigueiro, L. Zárate, A. Giménez, J. Arnaldos, E. Planas // Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. – Rotterdam, 2002. – P. 1–11.
40. **Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P.** The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation // Infrared Physics and Technology. – 2014. – Vol. 67. – P. 566–573. – DOI: 10.1016/j.infrared.2014.09.041.

STUDY OF FLAME CHARACTERISTICS OF BURNER WHEN SPRAYING LIQUID HYDROCARBONS WITH A STEAM JET

Kopyev E.P.[1], Anufriev I.S.[1,2], Shadrin E.Yu.[1], Loboda E.L.[3,4], Agafontsev M.V.[3,4], Mukhina M.A.[1]

[1] *Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia*
[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[3] *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*
[4] *Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, Tomsk, Russia*

In this work, flame characteristics of combustion of liquid hydrocarbons sprayed by a superheated water vapor in the burner device are investigated. Diesel fuel has been chosen as an example of liquid fuel. Flame characteristics like temperature distribution, effective emissivity are

measured in a wide range of system parameters (fuel and steam flow rates, steam temperature) by using a FLIR JADE J530SB thermal imaging camera and a platinum-rhodium-platinum-rhodium type B thermocouple. It has been obtained that at a steam flow rate increasing the flame temperature decreases. Also, the systems influence on the effective emissivity of the flame. The thermal imaging measurements are in a good agreement with the thermocouple data. The results can be used for numerical simulation of the combustion process under study.

Keywords: burner device, liquid hydrocarbons combustion, spraying fuel, combustion in the presence of superheated water vapor, flame temperature, IR thermography, thermocouple measurements.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-38-55

REFERENCES

1. Ballester J.M., Fueyo N., Dopazo C. Combustion characteristics of heavy oil-water emulsions. *Fuel*, 1996, vol. 75, pp. 695–705. DOI: 10.1016/0016-2361(95)00309-6.
2. Nadeem M., Rangkuti C., Anuar K., Haq M.R.U., Tan I.B., Shah S.S. Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants. *Fuel*, 2016, vol. 85, pp. 2111–2119. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.03.013.
3. Samec N., Kegl B., Dibble R.W. Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine. *Fuel*, 2002, vol. 81, pp. 2035–2044. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00135-7.
4. Armas O., Ballesteros R., Martos F.J., Agudelo J.R. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel. *Fuel*, 2005, vol. 84, pp. 1011–1018. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.11.015.
5. Dryer F.L. Water addition to practical combustion systems – Concepts and applications. *Symposium (International) on Combustion*, 1977, vol. 16, iss. 1, pp. 279–295. DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80332-9.
6. Watanabe H., Okazaki K. Visualization of secondary atomization in emulsified-fuel spray flow by shadow imaging. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, pp. 1651–1658. DOI: 10.1016/j.proci.2012.07.005.
7. Pugh D.G., Bowen P.J., March R., Crayford A.P., Runyon J., Morris S., Valera-Medina A., Giles A. Dissociative influence of H2O vapour/spray on lean blowoff and NOx reduction for heavily carbonaceous syngas swirling flames. *Combustion*, 2017, vol. 177, pp. 37–38. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.11.010.
8. Fells I., Rutherford A.G. Burning velocity of methane-air flames. *Combustion and Flame*, 1969, vol. 13, pp. 130–138. DOI: 10.1016/0010-2180(69)90043-1.
9. Babkin B.S., Vyun A.V. Effect of water vapor on the normal burning velocity of a methane–air mixture at high pressures. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1971, vol. 7, no. 3, pp. 339–341. DOI: 10.1007/BF00742820.
10. Boushaki T., Dhue Y., Selle L., Ferret B., Poinsot T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane air premixed flame: Experimental and numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, pp. 9412–9422. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.037.
11. Cong L., Dagaut P. Experimental and detailed modeling study of the effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NOx. *Energy and Fuels*, 2009, vol. 23, pp. 725–734. DOI: 10.1021/ef800832q.
12. Cadavid Y., Amell A., Alzate J., Bermejo G., Ebratt G.A. Analysis of water-fuel ratio variation in a gas turbine with a wet-compressor system by change in fuel composition. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, vol. 140, iss. 5, art. 052602. DOI: 10.1115/1.4038137.
13. Matynia A., Delfau J.-L., Pillier L., Vovelle C. Comparative study of the influence of CO2 and H2O on the chemical structure of lean and rich methane–air flames at atmospheric pressure. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 6, pp. 635–645. DOI: 10.1007/s10573-009-0078-5.
14. Hwang D.-J., Choi J.-W., Park J., Keel S.-I., Ch C.-B., Noh D.-S. Numerical study on flame structure and NO formation in CH4-O2-N2 counter flow diffusion flame diluted with H2O. *International Journal of Energy Research*, 2004, vol. 28, pp. 1255–1267. DOI: 10.1002/er.1028.

15. Renard C., Musick M., Van Tiggelen P.J., Vandooren J. Effect of CO_2 or H_2O addition on hydrocarbon intermediates in rich $C_2H_4/O_2/Ar$ flames. *Proceedings of European Combustion Meeting*, Orléans, France, 2003, p. 221.
16. Dryer F.L., Glassman I. Combustion chemistry of chain hydrocarbons. *Alternative Hydrocarbon Fuels: Combustion and Chemical Kinetics*, 1978, vol. 65, iss. 5, pp. 255–306. DOI: 10.2514/5.9781600865367.0255.0306.
17. Gottuk G.T., Roby R.J., Beyler C.L. The role of temperature on carbon monoxide production in compartment fires. *Fire Safety Journal*, 1995, vol. 24, iss. 4, pp. 315–331. DOI: 10.1016/0379-7112(95)00027-5.
18. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Characteristics of diesel fuel combustion in a burner with injection of a superheated steam jet. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2016, vol. 52, iss. 3, pp. 286–293. DOI: 10.1134/S0010508216030059. Translated from *Fizika goreniya i vzryva*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 37–44.
19. Anufriev I.S., Baklanov A.M., Borovkova O.V., Vigriyanov M.S., Leshchevich V.V., Sharypov O.V. Investigation of soot nanoparticles during combustion of liquid hydrocarbons with injection of a superheated steam jet into the reaction zone. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, vol. 53, iss. 2, pp. 140–148. DOI: 10.1134/S0010508217020034. Translated from *Fizika goreniya i vzryva*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 22–30.
20. Anufriev I., Arsentyev S., Vigriyanov M., Kopyev E., Sharypov O. Burning of substandard liquid hydrocarbons with steam gasification. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 115, art. 03013. DOI: 10.1051/matecconf/201711503013.
21. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V., Arsentyev S.S., Osintsev Ya.A. Combustion of sub-standard liquid hydrocarbons dispersed by a superheated steam jet. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1128, art. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012059.
22. Kopyev E.P., Shadrin E.Yu. Investigation of a promising method for liquid hydrocarbons spraying. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1105, art. 012092. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012092.
23. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels. *QIRT 2006. 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Padova, Italy, 2006. Available at: http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf (accessed 06.08.2019).
24. Bagavathiappan S., Lahiri. B.B., Saravanan T., Philip J., Jayakumar T. Infrared thermography for condition monitoring – a review. *Infrared Physics and Technology*, 2013, vol. 60, pp. 35–55. DOI: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.
25. Švantner M., Vacíková P., Honner M. IR thermography heat flux measurement in fire safety applications. *Infrared Physics and Technology*, 2012, vol. 55, pp. 292–298. DOI: 10.1016/j.infrared.2012.03.008.
26. Ding X.P., Li H.M., Zhu J.Q., Wang G.Y., Cao H.Z., Zhang Q., Ma H.L. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum. *Infrared Physics and Technology*, 2017, vol. 81, pp. 166–169. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.017.
27. Rodríguez-Martín M., Lagüela S., González-Aguilera D., Martinez J. Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography. *Infrared Physics and Technology*, 2015, vol. 71, pp. 492–500. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.013.
28. Grinzato E., Marinetti S., Bison P.G., Concas M., Fais S. Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones. *Infrared Physics and Technology*, 2004, vol. 46, iss. 1–2, pp. 63–68. DOI: 10.1016/j.infrared.2004.03.009.
29. Palacios A., Muñoz M., Darbra R.M., Casal J. Thermal radiation from vertical jet fires. *Fire Safety Journal*, 2012, vol. 51, pp. 93–101. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.03.006.
30. Zhang B., Liu Y., Laboureur D., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: thermal radiation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2015, vol. 54, pp. 9251–9256. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b02064.
31. Planas-Cuchi E., Chatris J.M., Lopez C., Arnaldos J. Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires using infrared thermography. *Fire Technology*, 2003, vol. 39, pp. 261–273. DOI: 10.1023/A:1024193515227.
32. Sudheer S., Prabhu S.V. Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, vol. 240, iss. 10, pp. 3474–3480. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.04.043.

33. Wang P., Liu N., Bai Y., Zhang L., Satoh K., Liu X. An experimental study on thermal radiation of fire whirl. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, pp. 693–705. DOI: 10.1071/WF17010.
34. Blankenhagela P., Wehrstedta K.-D., Mishrab K.B., Steinbachc J. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, vol. 54, pp. 246–253. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.008.
35. Saha A., Kumar R., Basu S. Infrared thermography and numerical study of vaporization characteristics of pure and blended bio-fuel droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, pp. 3862–3873. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.003.
36. Singh P., Chander S. Heat transfer and fluid flow characteristics of a pair of interacting dual swirling flame jets impinging on a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 24, pp. 90–108. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.034.
37. Loboda E.L., Reyno V.V., Agafontsev M.V. Choice of a spectral range for measuring temperature fields in a flame and recording high-temperature objects screened by the flame using IR diagnostic methods. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 2, pp. 278–282. DOI: 10.1007/s11182-015-0493-x. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 124–128.
38. Nevskii A.S. *Luchistyi teploobmen v pechakh i topkakh* [Radiant heat transfer in furnaces and furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 440 p.
39. Pastor E., Rigueiro A., Zárate L., Giménez A., Arnaldos J., Planas E. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Rotterdam, 2002, pp. 1–11.
40. Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P. The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation. *Infrared Physics and Technology*, 2014, vol. 67, pp. 566–573. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.09.041.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Копьев Евгений Павлович – родился в 1991 году, аспирант, инженер-исследователь, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН). Область научных интересов: проблемы создания энергетического оборудования, газовая динамика, неравновесные процессы. Опубликовано 21 научная работа. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск пр. Лаврентьева, 1. E-mail: kopyeve@itp.nsc.ru).

Kopyev Evgeny Pavlovich (b. 1991) – PhD student, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS. His research interests are currently focused on problems of creating energy equipment, gas dynamics, non-equilibrium processes. He is author of 21 scientific papers. (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kopyeve@itp.nsc.ru).

Ануфриев Игорь Сергеевич – родился в 1984 году, канд. физ.-мат. наук, страший нач. сотрудник, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН). Область научных интересов: вихревые топки, лабораторное моделирование, проблемы создания энергетического оборудования. Опубликовано 67 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск пр. Лаврентьева, 1. E-mail: anufriev@itp.nsc.ru).

Anufriev Igor Sergeevich (b. 1984) – Candidate of Sciences (Phys.&Math), Senior Researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS. His research interests are currently focused on vortex furnaces, laboratory modeling, problems of creating energy equipment. He is author of 67 scientific papers. (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: anufriev@itp.nsc.ru).

Шадрин Евгений Юрьевич – родился в 1992 году, младший науч. сотрудник, лаборатория радиационного теплообмена, ИТ СО РАН. Область научных интересов: вихревые топки, лабораторное моделирование. Опубликовано 47 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Shadrin Evgeniy Yurievich (b. 1992) – no degree, no rank, Junior Researcher, laboratory of Radiation Heat Transfer, IT SB RAS. His research interests are currently focused on vortex furnaces laboratory modeling. He is author of 47 scientific papers. (Address: 1, Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Лобода Егор Леонидович – родился в 1977 году, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физической и вычислительной механики, Томский государственный университет. Область научных интересов: МЖГ, тепломассообмен, горение, термография, ИК-диагностика. Опубликовано 69 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: loboda@mail.tsu.ru).

Loboda Egor Leonidovich (b. 1977) – Doctor of Sciences (Phys.&Math), Head Department of Physical and Computational Mechanics, Tomsk State University. His research interests are currently focused on problems of heat and mass transfer, combustion, thermography, infrared diagnostics. He is author of 69 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: loboda@mail.tsu.ru).

Агафонцев Михаил Владимирович – родился в 1992 году, инженер, учебная лаборатория кафедры физической и вычислительной механики ММФ, Национальный исследовательский Томский государственный университет. Область научных интересов: механика жидкости, газа и плазмы; инфракрасная термография; моделирование и прогноз катастроф. Опубликовано 26 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: kim75mva@gmail.com).

Agafontsev Mikhail Vladimirovich (b. 1992) – no degree, no rank, engineer, department of physical and computational mechanics, National research Tomsk State University. His research interests are currently focused on: mechanics of liquids, gas and plasma; infrared thermography; simulation of catastrophe prediction. He is author of 26 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kim75mva@gmail.com).

Мухина Мария Андреевна – родилась в 1998 году, лаборант, лаборатория радиационного теплообмена, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: теплоэнергетика. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1. E-mail: Mary-Andr@yandex.ru).

Mukhina Mariia Andreyevna (b. 1998) – no degree, no rank, laboratory assistant, laboratory of radiation heat transfer, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. Her research interests are currently focused on heat power engineering. (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: Mary-Andr@yandex.ru).

Статья поступила 19 апреля 2019 г.
Received April 19, 2019

To references:

Kopyev E.P., Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Loboda E.L.,Agafontsev M.V., Mukhina M.A. Izuchenie kharakteristik plameni gorelochnogo ustroistva pri raspylenii zhidkikh uglevodorodov parovoi struei [Study of flame characteristics of burner when spraying liquid hydrocarbons with a steam jet]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 38–55. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-38-55.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2019 апрель–июнь № 2 (43)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.282.2

ОБОБЩЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман
Новосибирский государственный технический университет

Развитие современных методов анализа и синтеза электромеханических систем, в том числе ударного действия, предполагает повышенный интерес к совершенствованию динамических моделей этих систем. В настоящей работе приводятся результаты создания обобщенной динамической модели однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия (СЭМУД), объединяющей в себе различные способы реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка. В качестве объекта исследования рассматривается электромагнитный ударный узел, получающий питание от источника энергии промышленной частоты, содержащий линейный электромагнитный двигатель и многомассовую механическую колебательную систему, периодически взаимодействующую с деформируемой средой. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования и расширения возможностей динамического расчета при решении комплексной задачи анализа и синтеза различных вариантов схем однокатушечных СЭМУД. Основу обобщенной модели составляют дифференциальные уравнения электрического равновесия и механического взаимодействия, поступательно движущихся инерционных масс, связанных упругими связями, полученные методом Лагранжа. На основе созданной обобщенной модели рассмотрен пример реализации динамической модели трехмассовой СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка, получающим питание от промышленного источника по однополупериодной схеме выпрямления. Отмечена возможность уменьшения затрат рабочего времени по созданию расчетных моделей различных вариантов схем однокатушечных СЭМУД при выполнении динамических расчетов.

Ключевые слова: обобщенная динамическая модель, синхронная электромагнитная машина, электромагнитный двигатель, электромагнитный ударный узел, метод Лагранжа, динамический расчет.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-56-71

Введение

В различных областях техники широко применяются механизмы и устройства, созданные на базе линейных электромагнитных машин для обеспечения технологических процессов и производств при пластической деформации и разрушении материалов ударом [1–6].

Среди многочисленного класса электромагнитных машин следует выделить синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД), основные преимущества которых – меньшее энергопотребление при работе в околорезонансных режимах, а также возможность в реализации ударных взаимодействий с частотой кратной частоте промышленной сети [7–10].

Несмотря на то что данный класс машин давно известен, методы по их расчету и проектированию по-прежнему востребованы и продолжают совершенствоваться [11–16].

В особенности это касается расчета нестационарных процессов, связанных с большим числом взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости, частоты ударов, свойств упругих связей механической системы, нагрева и т. д. [17–23].

© Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Проведение подобного расчета сопровождается большими трудностями, связанными с необходимостью построения математических моделей, наиболее точно отражающих динамическое состояние электромеханической системы вариантов схем СЭМУД, отличающихся по способу реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка СЭМУД [24–28].

Основным этапом проектирования данного класса машин по-прежнему сохраняется создание новых комплексных моделей и подходов, совершенствующих их расчет.

В этой связи, основываясь на единой методологической основе описания различных по конструкции однокатушечных синхронных электромагнитных машин ударного действия (СЭМУД), целесообразно рассмотреть обобщенную математическую модель в виде единой системы «источник питания – электромеханический преобразователь – ударная нагрузка».

Как правило, источник питания представляет собой внешнее устройство и образует электрическую подсистему. Ударный электромагнитный привод, являющийся предметом исследования, содержит магнитную и механическую подсистемы. Механическая подсистема СЭМУД характеризуется определенной степенью подвижности инерционных масс, связанных упругими связями. Электрическая и магнитная подсистемы связаны зависимостью величины потокосцепления от протекающего тока и координаты положения бойка. Число этих связей кратно возрастает количеству катушек. Механическая и магнитная подсистемы СЭМУД связаны зависимостью электромагнитного усилия, зависящего также от тока и координаты положения бойка.

В проводимых исследованиях ограничимся только вариантами конструктивных схем однокатушечных СЭМУД. С одной стороны, это позволит упростить решение поставленной задачи, с другой стороны, может послужить хорошей методологической основой при построении обобщенных моделей СЭМУД, содержащих более сложную систему из двух, трех и более катушек.

1. Разработка обобщенной модели однокатушечной СЭМУД

Несмотря на кажущуюся идентичность вариантов СЭМУД, их конструктивные схемы характеризуются различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка. В общем цикле возвратно-поступательного движения бойка преобладают динамические режимы работы, сопровождающиеся процессами преобразования потенциальной энергии в кинетическую энергию и обратно с частичной потерей энергии на преодоление сил сопротивления движению бойка механической природы, в том числе при ударных взаимодействиях [29, 30].

Обобщенная расчетная схема механической системы четырехмассовой однокатушечной СЭМУД с упругими связями представлена на рис. 1. Механизм ударного узла обобщенной модели СЭМУД представляет собой взаимосвязанную многомассовую электромеханическую систему. Поступательное движение бойка массой m_1 возникает в результате взаимодействия магнитного поля катушки, по виткам которой протекает пульсирующий ток, с ферромагнитной массой бойка. В результате такого взаимодействия боек совершает возвратно-поступательные перемещения и наносит удар по рабочему инструменту массой m_2. В зависимости от конструктивной схемы СЭМУД обратный ход бойка обеспечивается частично за счет потенциальной энергии упругой пружины, частично за счет кинетической энергии при отскоке бойка при его взаимодействии с рабочим инструментом и частично в результате взаимодействия магнитного поля катушки и

ферромагнитного бойка. Частота движения бойка, как правило, равна или кратна частоте питающего источника промышленной частоты $f = 50$ Гц. Рабочий цикл ударного узла выполняется при условии полной синхронизации координаты положения бойка с периодическими импульсами напряжения, поступающими на катушку.

Механическая система СЭМУД (рис. 1) содержит в своем составе традиционные массоинерционные, упругие и диссипативные звенья. В качестве обобщенных координат принимаем линейные перемещения центра масс бойка x_1 массой m_1, рабочего инструмента x_2 массой m_2, магнитопровода с закрепленной внутри катушкой x_3 массой m_3 и перемещения удерживающего устройства x_4 массой m_4.

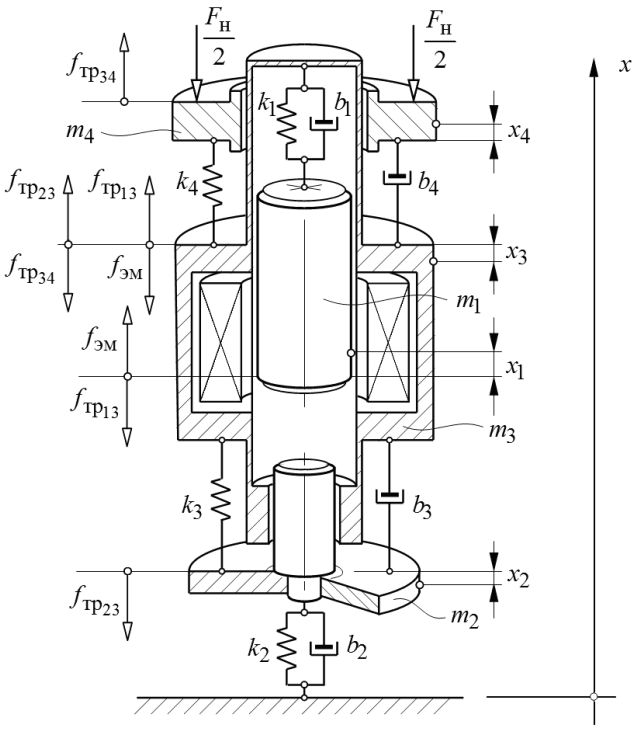


Рис. 1 – Обобщенная расчетная схема СЭМУД

Fig. 1 – Generalized design scheme SCSIEM

Уравнение электрического равновесия обобщенной модели (рис. 1) используем в известном виде:

$$u(t) = i\,r + \frac{d\psi(i_\mu,\ x_1)}{dt}, \tag{1}$$

где $i = i_п + i_\mu$ – ток на входе источника; $i_п$ – ток потерь; i_μ – ток намагничивания катушки; r – активное сопротивление катушки; $\psi(i_\mu,\ x_1)$ – потокосцепление катушки, зависящее от тока намагничивания i_μ и координаты x_1 положения бойка.

Уравнение (1) предусматривает насыщение магнитопровода, потоки рассеяния и действие вихревых токов.

Уравнение движения механической системы получим на основании уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial x_i}=Q_i^{\Pi}+Q_i^{\Phi}+Q_i^{В}, \quad i=1,2,\ldots,N, \tag{2}$$

где $Q_i^{\Pi}=-\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}$, $Q_i^{\Phi}=-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}$, $Q_i^{В}$ – обобщенные силы, соответствующие потенциальной энергии, энергиям рассеяния сопротивления движению (диссипативная функция Рэлея), внешних воздействий и сил трения; $N=4$ – принимаемое в расчетах ограничение числа степеней свободы системы согласно рис. 1.

Потенциальную энергию механической части рассматриваем в предположении устойчивого статического равновесия многомассовой системы. Колебания в пространстве будут описываться зависимостью обобщенных координат x_i от времени, отсчитываемых от положения устойчивого статического равновесия. Рассматривая движение масс $m_1 \ldots m_4$ в выбранной системе координат (рис. 1), кинетическую энергию представим в виде

$$T=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N=4} m_i \dot{x}_i^2=\frac{1}{2}\left(m_1\dot{x}_1^2+m_2\dot{x}_2^2+m_3\dot{x}_3^2+m_4\dot{x}_4^2\right), \tag{3}$$

где $\dot{x}_i$ – обобщенные скорости.

Обобщенные силы Q_i^{Π}, Q_i^{Φ} определяются равенствами:

$$Q_i^{\Pi}=-\frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4}\frac{1}{2}\left[k_1(x_1-x_3)^2+k_2x_2^2+k_3(x_3-x_2)^2+k_4(x_4-x_3)^2\right]}{\partial x_i}, \tag{4}$$

где x_i – обобщенные координаты; $k_1 \ldots k_4$ – статические коэффициенты жесткости упругих связей;

$$Q_i^{\Phi}=-\frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4}\frac{1}{2}\left[b_1(\dot{x}_1-\dot{x}_3)^2+b_2\dot{x}_2^2+b_3(\dot{x}_3-\dot{x}_2)^2+b_4(\dot{x}_4-\dot{x}_3)^2\right]}{\partial \dot{x}_i}, \tag{5}$$

где $b_1 \ldots b_4$ – коэффициенты вязкого трения упругих связей.

Для определения значений обобщенных сил внешних воздействий и сил трения, соответствующих обобщенным координатам (рис. 1), воспользуемся принципом возможных перемещений:

$$Q_{x_1}=f_{эм}\left(i_{\mu},x_1\right)-f_{тр_{13}}\operatorname{sign}\dot{x}_1;\ Q_{x_2}=-f_{тр_{23}}\operatorname{sign}\dot{x}_2; \tag{6}$$

$$Q_{x_3}=-f_{эм}(i_{\mu},\ x_1)+\left(f_{тр_{13}}+f_{тр_{23}}-f_{тр_{34}}\right)\operatorname{sign}\dot{x}_3; \tag{7}$$

$$Q_{x_4}=f_{тр_{34}}\operatorname{sign}\dot{x}_4-F_{н}, \tag{8}$$

где $f_{эм}(i_\mu, x_1)$ – вынуждающая электромагнитная сила; $f_{тр_{13}}, f_{тр_{23}}, f_{тр_{34}}$ – силы сухого трения скольжения; $F_н$ – постоянная величина усилия нажатия.

Используя уравнение электрического равновесия (1) и уравнения Лагранжа второго рода (2) с учетом установленных зависимостей (3)–(5) и значений обобщенных сил внешних воздействий и сил трения (6)–(8), получим обобщенную математическую модель СЭМУД без учета ударного взаимодействия.

Дополняя полученную систему условиями соударения ударных масс и заданных пределов ограничения движения бойка, окончательный процесс движения рассматриваем как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обусловленных различного рода потерями энергии в электромеханической системе [25–28].

Последующее решение уравнений может быть выполнено с применением, например, метода структурного моделирования в Matlab Simulink [31].

При изучении динамических процессов в СЭМУД необходимо дополнительно располагать точными сведениями о закономерности изменения потокосцепления $\psi = f(i_\mu, x_1)$ и электромагнитного усилия $f_{эм} = f(i_\mu, x_1)$ от тока намагничивания и координаты положения бойка, что связано с изучением характеристик магнитного поля, т.е. решением полевой задачи. Для решения полевой задачи и определения массива значений опорных точек статических параметров потокосцепления и электромагнитного усилия следует рекомендовать стандартные программы конечно-элементного моделирования FEMM, ELCUT или ANSYS [32–35].

2. Пример использования обобщенной модели

В качестве примера использования обобщенной модели (рис. 1) рассмотрим основные этапы реализации модели однокатушечной СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка, идентичной по конструкции и параметрам электромагнитной машине МС-18/36 [7].

Основные этапы реализации подобного расчета для четырехмассовой СЭМУД подробно рассмотрены в работах [25, 26]. Один из возможных вариантов конструктивной схемы ударного узла трехмассовой СЭМУД приведен на рис. 2.

Для реализации рабочего цикла с двухсторонним свободным выбегом бойка используется единственная катушка, обеспечивающая разгон ударной массы бойка электромагнитными силами в двух направлениях.

Полный рабочий цикл ударного узла осуществляется за время двух периодов напряжения питающего источника, что при частоте $f = 50\,Гц$ обеспечивает синхронную частоту ударов бойка $n_{уд}$ и длительность времени рабочего цикла $t_ц$:

$$n_{уд} = \frac{60f}{2p} = 1500\,уд/мин\,; \quad t_ц = \frac{2p}{f} = 0,04\,с\,,$$

где $2p = 2$ – число периодов напряжения в течение времени рабочего цикла.

При построении модели полагаем, что механическая колебательная система имеет три степени свободы $(N = 3)$. Рассматривая движение инерционных масс в установленной системе координат (рис. 1), при условии $m_4 = 0$, $x_4 = 0$, $k_4 = 0$ и $b_4 = 0$ кинетическая энергия системы – T и обобщенные силы – $Q^П$, $Q^Ф$ согласно с (3) – (5) будут определяться равенствами:

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2}; \tag{9}$$

$$Q_i^{\text{П}} = -\frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2}\left[k_1 (x_1 - x_3)^2 + k_2 x_2^2 + k_3 (x_3 - x_2)^2\right]}{\partial x_i}; \tag{10}$$

$$Q_i^{\text{Ф}} = -\frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2}\left[b_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2 + b_2 \dot{x}_2^2 + b_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2\right]}{\partial \dot{x}_i}. \tag{11}$$

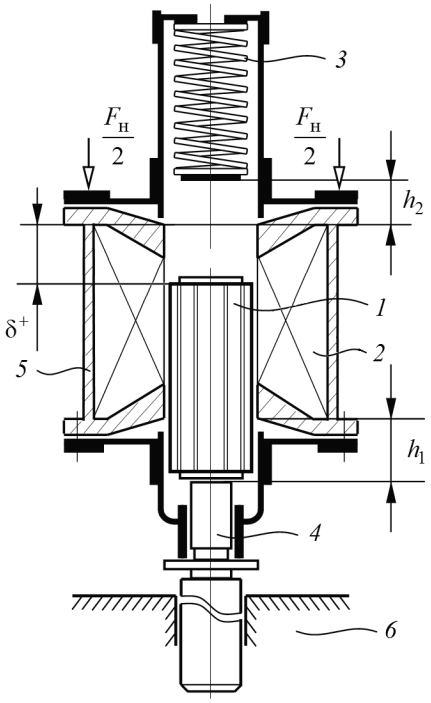


Рис. 2 – Электромагнитный ударный узел трехмассовой СЭМУД:

1 – ударная масса бойка; *2* – катушка; *3* – пружина; *4* – рабочий инструмент; *5* – магнитопровод; *6* – деформируемая среда

Fig. 2 – Electromagnetic three-mass shock unit SCSIEM:

1 – striking mass; *2* – coil; *3* – spring; *4* – work tool; *5* – magnetic core; *6* – deformable medium

Обобщенные силы внешних воздействий и силы трения в соответствии с (6) и (7) при условии $f_{\text{тр}_{34}} = 0$:

$$Q_{x_1} = f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1) - f_{\text{тр}_{13}} \operatorname{sign} \dot{x}_1; \quad Q_{x_2} = -f_{\text{тр}_{23}} \operatorname{sign} \dot{x}_2; \tag{12}$$

$$Q_{x_3} = -f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1) + \left(f_{\text{тр}_{13}} + f_{\text{тр}_{23}}\right) \operatorname{sign} \dot{x}_3 - F_н. \tag{13}$$

Взяв частные производные от кинетической энергии и обобщенных сил (9)–(11), а также производные по времени согласно уравнению (2), математическая модель динамического состояния СЭМУД (рис. 2) без учета ударного взаимодействия при наличии внешних воздействий и сил трения будет описываться системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u(t) = i\,r + \dfrac{d\psi\left(i_{\mu}, x_1\right)}{dt}; \\ m_1 \dfrac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1\left(\dfrac{dx_1}{dt} - \dfrac{dx_3}{dt}\right) + k_1\left(x_1 - x_3\right) = f_{\text{эм}}\left(i_{\mu}, x_1\right) - f_{\text{тр}_{13}} \operatorname{sign}\dfrac{dx_1}{dt}; \\ m_2 \dfrac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \dfrac{dx_2}{dt} - b_3\left(\dfrac{dx_3}{dt} - \dfrac{dx_2}{dt}\right) + k_2 x_2 - k_3\left(x_3 - x_2\right) = -f_{\text{тр}_{23}} \operatorname{sign}\dfrac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \dfrac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1\left(\dfrac{dx_1}{dt} - \dfrac{dx_3}{dt}\right) + b_3\left(\dfrac{dx_3}{dt} - \dfrac{dx_2}{dt}\right) - k_1\left(x_1 - x_3\right) + \\ + k_3\left(x_3 - x_2\right) = -f_{\text{эм}}\left(i_{\mu}, x_1\right) + \left(f_{\text{тр}_{13}} + f_{\text{тр}_{23}}\right) \operatorname{sign}\dfrac{dx_3}{dt} - F_{\text{н}}. \end{cases} \quad (14)$$

Движение бойка выполняется в квазиустановившемся режиме. Наличие ограничителей движения в конструкции ударного узла не позволяют бойку выходить за установленные пределы:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, \quad \text{при} \quad \delta^+ = h_1; \\ h_1 - \delta^+, \quad \text{при} \quad x_1 \le h_1; \\ h_1 + \delta^-, \quad \text{при} \quad x_1 > h_1, \end{cases} \quad (15)$$

где δ^+, δ^- – переменная величина воздушного рабочего зазора, образованного положением бойка относительно верхней и нижней полюсной системы катушки; h_1 – расстояние, пройденное бойком от положения магнитного равновесия до ударного сечения рабочего инструмента; h_2 – расстояние от положения магнитного равновесия до контакта с буферной пружиной (рис. 2).

Также следует учесть зависимость обобщенных сил, действующих на интервале перемещения бойка, которые будут записываться кусочно-линейными функциями:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0 \quad \text{при} \quad 0 \le x_1 < h_1 + h_2; \\ k_1\left(x_1 - x_3\right) \quad \text{при} \quad x_1 \ge h_1 + h_2, \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = \begin{cases} 0 \quad \text{при} \quad 0 \le x_1 < h_1 + h_2; \\ b_1\left(\dfrac{dx_1}{dt} - \dfrac{dx_3}{dt}\right) \quad \text{при} \quad x_1 \ge h_1 + h_2. \end{cases} \quad (17)$$

Полагаем, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые перемещению инструмента, зависят от жесткости и демпфирующих свойств введенных упругих связей.

Окончательный процесс движения рассматриваем как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обусловленных различного рода потерями энергии в электромеханической системе.

Дополнение системы (14) условиями соударения ударных масс и действующих в системе обобщенных сил (15)–(17) позволяет рассматривать математическую модель динамического состояния ударного узла трехмассовой СЭМУД с двухсто-

ронним свободным выбегом бойка в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u(t) = i\,r + \dfrac{d\psi(i_\mu,\, x_1)}{dt}, \text{ где } i = i_п + i_\mu; \\ m_1 \dfrac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} \dfrac{m_1 \overline{v}_1}{\tau_и} - f_{тр13}\,\mathrm{sign}\dfrac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i_\mu,\, x_1), \text{ если } \dfrac{dx_1}{dt} > 0, \\ \text{при } 0 \le x_1 < h_1 + h_2; \\ -\tilde{\lambda}_1 - f_{тр13}\,\mathrm{sign}\dfrac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i_\mu,\, x_1) \text{ при } x_1 \ge h_1 + h_2; \\ -f_{тр13}\,\mathrm{sign}\dfrac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i_\mu,\, x_1) \text{ при } 0 \le x_1 < h_1 + h_2, \text{ если } \dfrac{dx_1}{dt} < 0; \end{cases} \\ m_2 \dfrac{d^2 x_2}{dt^2} = -\dfrac{m_2 \overline{v}_2}{\tau_и} - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_3 - f_{тр23}\,\mathrm{sign}\dfrac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \dfrac{d^2 x_3}{dt^2} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 - f_{эм}(i_\mu,\, x_1) + \left(f_{тр13} + f_{тр23}\right)\mathrm{sign}\dfrac{dx_3}{dt} \\ \text{при } 0 \le x_1 < h_1 + h_2; \\ \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 - f_{эм}(i_\mu,\, x_1) + \left(f_{тр13} + f_{тр23}\right)\mathrm{sign}\dfrac{dx_3}{dt} \\ \text{при } x_1 \ge h_1 + h_2, \end{cases} \end{cases}$$

где $\tilde{\lambda}_1 = b_1\left(\dfrac{dx_1}{dt} - \dfrac{dx_3}{dt}\right) + k_1(x_1 - x_3)$; $\tilde{\lambda}_2 = b_2\dfrac{dx_2}{dt} + k_2\,x_2$; $\tilde{\lambda}_3 = b_3\left(\dfrac{dx_3}{dt} - \dfrac{dx_2}{dt}\right) + k_3(x_3 - x_2)$; $\dfrac{m_1\overline{v}_1}{\tau_и}$, $\dfrac{m_2\overline{v}_2}{\tau_и}$ – импульсы сил, действующие на массы соударяющихся тел в конце частично упругого удара; v_1, $\overline{v}_1$ – скорости центра массы бойка в начале и конце удара; v_2, $\overline{v}_2$ – скорости центра массы рабочего инструмента в начале и конце удара; $\tau_и$ – длительность времени ударного импульса.

С помощью решения полевой задачи рассчитывался массив значений опорных точек статических параметров потокосцепления $\psi(i,\, \delta)$ и электромагнитного усилия $f_{эм}(i, \delta)$ в зависимости от тока и положения бойка, где $\delta = h_1 - x_1$. Для решения динамической части задачи применялся аппарат структурного моделирования в среде Matlab Simulink. Задание функций двух аргументов статических параметров модели выполнялся с помощью блока двухмерных таблиц.

В качестве примера на рис. 3–5 приведены временные диаграммы рабочего процесса ударного узла трехмассовой СЭМУД (рис. 2) идентичной по конструкции МС-18/36 [7].

Верификация полученной модели производилась сравнением расчетных значений энергии удара $A_{уд}$ (Дж), действующего значения тока I (А), потребляемой мощности P_1 (Вт), полезной мощности P_2 (Вт) и коэффициента полезного действия (КПД) с показателями, полученными на физической модели.

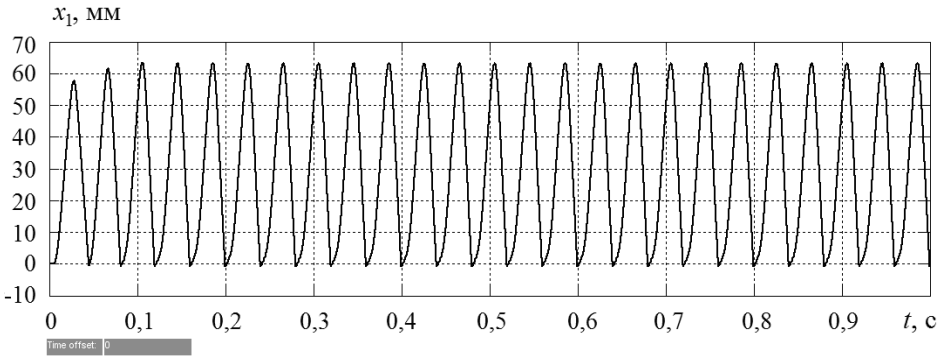


Рис. 3 – Временная диаграмма перемещения бойка $x_1(t)$

Fig. 3 – Timing diagram of the movement of the striker $x_1(t)$

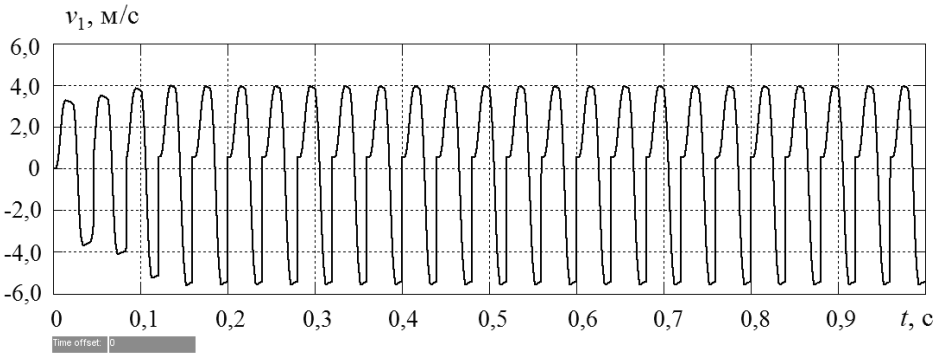


Рис. 4 – Временная диаграмма скорости перемещения бойка $v_1(t)$

Fig. 4 – Timing diagram of the movement speed of the striker $v_1(t)$

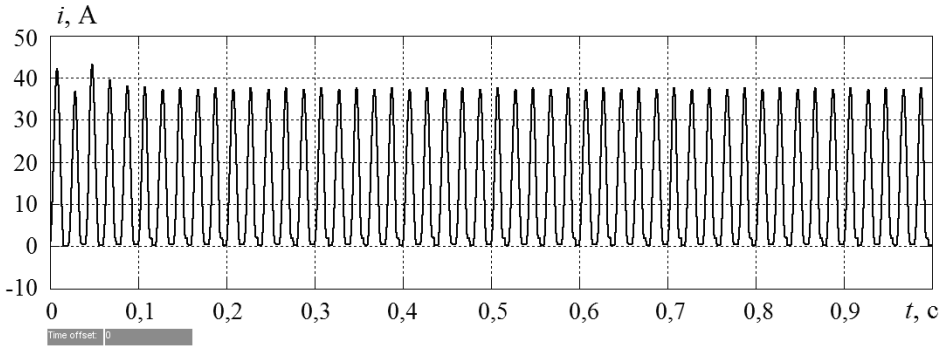


Рис. 5 – Временная диаграмма тока $i(t)$ в цепи катушки

Fig. 5 – Timing diagram of the current $i(t)$ in the coil circuit

Максимальная относительная погрешность при расчетах лежит в пределах погрешности обработки экспериментальных данных и не превышает 6–8 % [26].

3. Заключение

Предложено построение обобщенной модели динамики многомассовой однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия, наиболее точно отражающей взаимосвязи в электромеханической системе при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой. Обобщенная модель включает в себя широкий круг конструктивных исполнений базовых вариантов существующих и новых схем, что упрощает процесс создания математических моделей однокатушечных СЭМУД, представляющих в большинстве случаев сложную и многофакторную динамическую систему с большим набором связанных переменных и сокращает затраты времени при выполнении динамических расчетов.

Универсальность обобщенной модели состоит в возможности учета взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах вариантов схем СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
3. **Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
4. **Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
5. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
6. **Нейман В.Ю. Петрова А.А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
7. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
8. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
9. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 280–285.
10. **Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А.** Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитых машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 271–277.
11. **Нейман В.Ю.** К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы / Новосиб. гос. техн. ун-т; под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
12. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.

13. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
14. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
15. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
16. **Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гумерова М.Б.** Математическое моделирование динамических режимов электромагнитных демпфирующих элементов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 5 (40). – С. 86–90.
17. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
18. Расчет динамики включения электромагнита постоянного тока / Ю.А. Бахвалов, Б.Н. Лобов, Г.В. Могилевский, А.Г. Никитенко // Электротехника. – 1982. – № 1. – С. 48–51.
19. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.
21. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
22. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
23. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Сравнение динамики рабочих циклов двухкатушечных синхронных электромагнитных машин ударного действия со свободным выбегом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 1 (34). – С. 98–115.
24. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.
25. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
26. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.
27. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–79.
28. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.

29. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
30. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – № 2 (39). – С. 70–81.
31. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
32. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
33. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
34. **Андреева Е.Г., Семина И.А., Татевосян А.А.** Исследование поля магнитной системы открытого типа с помощью программного пакета ANSYS // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 173–175.
35. **Татевосян А.С., Татевосян А.А.** Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 96 с.

GENERALIZED MODEL OF A SINGLE-COIL SYNCHRONOUS IMPACT ELECTROMAGNETIC MACHINE

Neyman L.A., Neyman V.Yu.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Development of modern methods of electromechanical systems analysis and synthesis including impact ones requires the improvement of their dynamical models. The description of the generalized dynamical model of a single-coil synchronous impact electromagnetic machine (SCSIEM) that combines different methods of implementation of reciprocated motion of the striker impact mass is presented. The electromagnetic impact unit considered as a research subject is powered from a 50 Hz power source. It consists of the linear electromagnetic motor and the multimass mechanical oscillatory system periodically interacting with a deformed medium. The investigation is of current importance, because it is necessary to improve and extend the dynamic design procedure when the complex problem of analysis and synthesis of SCSIEM scheme variants is solved. The generalized model is based on the differential equations of the electrical balance and mechanical interaction of traveling inertial masses linked by spring linkages derived by the Lagrange method. An example of the dynamical model based on the generalized one is considered for a three-mass SCSIEM with striker two-side free running-out powered from 50 Hz power supply trough a half-period rectifier. Working time for creation of dynamical design models for different variants of SCSIEM can be decreased.

Keywords: generalized dynamical model, synchronous electromagnetic machine, electromagnetic motor, electromagnetic impact unit, Lagrange method, dynamical design.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-56-71

REFERENCES

1. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drive for pulse technology and vibroimpulsnyh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
2. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
3. Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineinyi impul'snyi elektromagnitnyi privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive the machine with autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.

4. Simonov B.F., Neiman V.Yu., Shabanov A.S. Impul'snyi lineinyi elektromagnitnyi privod dlya skvazhinnogo vibroistochnika [Pulsed linear electromagnetic drive for downhole vibration source]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 2017, no. 1, pp. 118–126.
5. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Forging equipment with a linear electromagnetic motor for the mechanization of processes of impact assembly and stamping small parts]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.
6. Neyman V.Yu. Petrova A.A. Sravnenie sposobov forsirovki impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei [Comparison of forcing methods of pulsed linear electromagnetic motors]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50.
7. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovanie elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
8. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.
9. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Novye konstruktivnye resheniya problemy tochnoi sinkhronizatsii vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya boika neupravlyaemoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya [The new design address the precise timing of the reciprocating movement of the striker unguided electromagnetic machine percussion]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 280–285.
10. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. [Trends in the development of synchronous two-winding electromagnetic machines for impulse technologies]. *Aktual'nye problemy energetiki APK*: materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual problems of power engineering of the agroindustrial complex: materials II international scientific-practical conference]. Saratov, 2011, pp. 271–277. (In Russian).
11. Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [*On the question of the rationalization the working process and the selection of designs schemes electromagnetic percussion machines*]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 155–169.
12. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [About the method of choosing the type of electromagnet according to the values of the design factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
13. Malinin L.I., Neiman V.Yu. Opredelenie napryazheniya preobrazovaniya energii i elektromagnitnykh sil v elektromekhanicheskikh sistemakh [Determination of the voltage of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 57–62.
14. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyanie sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [The influence of the ratio of the main dimensions of the electromagnets on the values of the design factor and the indicator of efficiency]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
15. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primenenie metoda provodimostei dlya ucheta sily odnostoronnego magnitnogo prityazheniya asimmetrichnogo elektromagnita [Application conductivities method to account for the strength of a unilateral asymmetric magnetic attraction of the electromagnet]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 214–218.

16. Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gumerova M.B. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov elektromagnitnykh dempfiruyushchikh elementov [Mathematical modeling of dynamic modes of electromagnetic damping elements]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik UGATU*, 2010, T. 14, no. 5 (40), pp. 86–90.
17. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Periodicheskie rezhimy v elektromagnitnykh vibratsionnykh preobrazovatelyakh [Periodic modes in the electromagnetic vibration converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2010, vol. 14, no. 1 (36), pp. 50–55.
18. Bahvalov Yu.A., Lobov B.N., Mogilevskii G.V., Nikitenko A.G. Raschet dinamiki vklyucheniya elektromagnita postoyannogo toka [Calculation inclusion DC electromagnet dynamics]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 1982, no. 1, pp. 48–51. (In Russuan).
19. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Uproshchennyi raschet elektromagnitnogo udarnogo privoda v povtorno-kratkovremennom rezhime raboty [A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 50–53. (In Russian).
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeistvii i nizkochastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for generating the force effects systems and low-frequency vibrations]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.
21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovode [Simulation of processes in an electromagnetic vibration converter with power loss in the steel magnetic core]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 73–78.
22. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.
23. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Sravnenie dinamiki rabochikh tsiklov dvukhkatushechnykh sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Comparison of the operating cycles dynamics of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with head free running-out]. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 98–115.
24. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatel'nogo dvizheniya s uprugimi svyazyami [Mathematical model of electromechanical system with vibrational motion of elastic connections]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 6, pp. 35–40.
25. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki elektromagnitnogo udarnogo uzla s uprugimi svyazyami [A dynamic mathematical model of the electromagnetic impact unit with spring linkages]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 2 (31), pp. 94–107.
26. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoj sinhronnoj elektromagnitnoj mashiny udarnogo dejstviya s dvuhstoronnim vybegom bojka [Mathematical model of the dynamics of a single-coil synchronous electro-magnetic percussion machine with double-sided striking of the striker]. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114.

27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s inertsionnym reversom boika [A dynamic model of a two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with an inertial head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 4 (33), pp. 61–79.
28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of dynamics of two-inductor synchronous impact electromagnetic machines with free head running with free head running-out]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40.
29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika [Duty cycle synchronous electromagnetic machine with free coast of striker]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
30. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika v katushke pryamogo khoda [An operating cycle of the two-inductor synchronous electromagnetic machine with a free head running-out in the driving stroke inductor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 70–81.
31. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroistv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
32. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electric devices: magnetic circuit, field and program FEMM]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
33. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Raschet pokazatelya ekonomichnosti silovogo elektromagnita postoyannogo toka s pomoshch'yu modelirovaniya magnitnogo polya [The calculation of the efficiency indicator of a DC power electromagnet using magnetic field simulation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2008, no. 6, pp. 21–24.
34. Andreeva E.G., Semina I.A., Tatevosyan A.A. Issledovanie polya magnitnoi sistemy otkrytogo tipa s pomoshch'yu programmnogo paketa ANSYS [Investigation of the magnetic field open-type system using ANSYS software package]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin – Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2014, no. 1, pp. 173–175.
35. Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A. *Raschet elektricheskikh i magnitnykh polei metodom konechnykh elementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT* [Calculation of electric and magnetic fields by finite element method using ELCUT programs]. Omsk, OmGTU Publ., 2015. 96 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, д-р техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и импульсные технологии. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna – (b. 1966), Doctor of Sciences (Eng.), Associate Professor at the Department of Electrical Complexes of the Novosibirsk State Technical University. Research interests: linear synchronous electromagnetic machine and pulse technologies. She is author of 100 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com).

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

Neyman Vladimir Yurievich – (b. 1960), Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Theory of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. Research interests – power electromagnetic pulse systems. Author and co-author of over 200 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Статья поступила 04 мая 2019 г.
Received May 04, 2019

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Obobshchennaya dinamicheskaya model' odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya [Generalized model of a single-coil synchronous impact electromagnetic machine]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 56–71. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-56-71.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2019 апрель–июнь № 2(43)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.4

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА НА ГРАНИЦЫ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Б.С. Резников, О.В. Шеремет
Новосибирский государственный технический университет

На основе модели для материалов с внутренней структурой разработан подход и программный комплекс расчета границ допустимых температурных воздействий в зависимости от количества элементов композиции, их расположения в пространстве, удельного объемного содержания и физико-механических свойств фазовых материалов. Указаны рациональные параметры структуры композита и механические характеристики элементов композиции, при которых достигаются наибольшие значения температурного воздействия до начала разрушения.

Ключевые слова: микронеоднородные среды, стационарное температурное воздействие, эффективные теплофизические характеристики, структурные условия прочности, предельное состояние композита.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-72-79

Введение

Многие конструкции из композиционных материалов работают в широком диапазоне температур, поэтому возникает необходимость определять предельно-допустимые значения температурного воздействия для структурно-неоднородных сред. В отличие от работ [1, 2], где рассмотрено влияние заданного (фиксированного) значения температуры на предельное состояние слоистых композитов при комбинированном силовом нагружении, в данной статье определены допустимые значения температурного воздействия, соответствующие началу разрушения структурно-неоднородных сред с продольно-поперечным расположением фаз.

1. Основные физические соотношения и алгоритм исследования начального разрушения многофазных сред при температурном воздействии

Для расчета границ допустимых значений температурного воздействия структурно-неоднородных композитов, состоящих из «$M + N$» продольно-поперечных фаз (рис. 1), воспользуемся законом Дюамеля–Неймана из [3, 4].

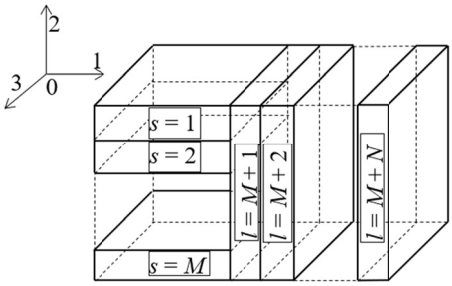


Рис. 1. – Представительный элемент композита с продольно-поперечным расположением «$M + N$» фаз

Fig. 1. – Representative element of composite with longitudinal-transverse arrangement of «$M + N$» phases

© 2018 Б.С. Резников, О.В. Шеремет

В случае, когда характерный субструктурный элемент композита находится в однородном температурном поле при отсутствии силового воздействия и материалы фаз являются ортотропными (в системе $n_1On_2n_3$ рис. 1), тогда, учитывая соотношения из [3, 4], получим следующие выражения для напряжений:

в s-й продольной фазе

$$\sigma_j^{(s)} = \Theta\Psi_{jt}^{(s)},\ \sigma_4^{(s)} = \sigma_5^{(s)} = \sigma_6^{(s)} = 0,$$
$$\sigma_2^{(s)} = \Theta\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(1)}\ \left(j = 1,3;\ s = 1,2,\ldots,M\right); \tag{1}$$

в l-й поперечной фазе

$$\sigma_j^{(l)} = \Theta\Psi_{jt}^{(l)},\ \sigma_1^{(l)} = \sigma_4^{(l)} = \sigma_5^{(l)} = \sigma_6^{(l)} = 0,$$
$$\left(j = 2,3;\ l = M+1, M+2,\ldots,M+N\right). \tag{2}$$

При этом для величин $\Psi_{jt}^{(s)}$ $\left(j = 1,3\right)$, $\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(1)}$, $\Psi_{jt}^{(l)}$ $\left(j = 2,3\right)$ имеем следующие выражения:

$$\Psi_{jt}^{(s)} = \mathrm{B}_{j2}^{(s)}\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(1)} + \mathrm{B}_{j3}^{(s)}\tilde{\mathrm{B}}_{3t}^{(1)} + \mathrm{B}_{jt}^{(s)}\ \left(j = 1,3;\ s = 1,2,\ldots,M\right);$$

$$\tilde{\mathrm{B}}_{it}^{(K)} = \tilde{\beta}_{2i}^{(K)}\alpha_{22}^{t} + \tilde{\beta}_{i3}^{(K)}\alpha_{33}^{t} + \tilde{\beta}_{it}^{(K)}\ \left(i = 2,3;\ K = 1,2\right);$$

$$\mathrm{B}_{j2}^{(s)} = \beta_{1j}^{(s)}b_{12} + \beta_{j3}^{(s)}b_{23} + \beta_{j2}^{(s)},\ \mathrm{B}_{j3}^{(s)} = \beta_{1j}^{(s)}b_{13} + \beta_{j3}^{(s)}b_{33},$$

$$\mathrm{B}_{jt}^{(s)} = \beta_{1j}^{(s)}\alpha_{11}^{t} + \beta_{j3}^{(s)}\alpha_{33}^{t} + \beta_{jt}^{(s)}\ \left(j = 1,3;\ s = 1,2,\ldots,M\right).$$

$$\Psi_{jt}^{(l)} = \mathrm{B}_{j2}^{(l)}\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(2)} + \mathrm{B}_{j3}^{(l)}\tilde{\mathrm{B}}_{3t}^{(2)} + \mathrm{B}_{jt}^{(l)},$$

$$\mathrm{B}_{ij}^{(l)} = \beta_{2i}^{(l)}b_{2j} + \beta_{i3}^{(l)}b_{j3},$$

$$\mathrm{B}_{jt}^{(l)} = \beta_{2j}^{(l)}\alpha_{22}^{t} + \beta_{j3}^{(l)}\alpha_{33}^{t} + \beta_{jt}^{(l)}\ \left(i = 2,3;\ j = 2,3;\ l = M+1, M+2,\ldots,M+N\right).$$

Эффективные коэффициенты податливости b_{jk} $\left(j,k = 1,2,3\right)$ линейного теплового расширения α_{ii}^{t} $\left(i = 1,2,3\right)$ и величины

$$\tilde{\beta}_{ij}^{(K)}\ \left(i,j = 1,2,3;\ K = 1,2\right),\ \tilde{\beta}_{it}^{(K)}\ \left(i,j = 2,3;\ K = 1,2\right),$$

$$\beta_{ij}^{(m)},\ \beta_{jt}^{(m)}\ \left(i,j = 1,2,3;\ m = 1,2,\ldots,M, M+1, M+2,\ldots,M+N\right)$$

получены в [4], $\Theta = T - T_0$ – приращение температуры; T_0 – температура в исходном состоянии. Для напряжений приняты матричные обозначения [3–5] и ниже используются в основном обозначения из [4].

Для определения границ допустимых значений температурных воздействий, при которых начинается разрушение многофазного композита, будем использовать структурный подход [6] и условие прочности [7] для материала каждой фазы. В рассматриваемом случае, учитывая (1), (2) и [7], имеем:

для продольных фаз $(s = 1, 2, \ldots, M)$

$$\sum_{j=1}^{3}\left(\sigma_j^{(s)}\right)^2-\frac{1}{2}\sum_{\substack{i,j=1\\(i\neq j)}}^{3}\sigma_j^{(s)}\sigma_i^{(s)}+\left(\sigma_{(-)}^{(s)}-\sigma_{(+)}^{(s)}\right)\sum_{j=1}^{3}\sigma_j^{(s)}=\sigma_{(-)}^{(s)}\sigma_{(+)}^{(s)}\,; \tag{3}$$

для поперечных фаз $(l=M+1,\ M+2,\ \ldots,\ M+N)$

$$\sum_{j=2}^{3}\left(\sigma_j^{(l)}\right)^2-\sigma_2^{(l)}\sigma_3^{(l)}+\left(\sigma_{(-)}^{(l)}-\sigma_{(+)}^{(l)}\right)\sum_{j=2}^{3}\sigma_j^{(l)}=\sigma_{(-)}^{(l)}\sigma_{(+)}^{(l)}\,, \tag{4}$$

где $\sigma_{(+)}^{(m)}$ и $\sigma_{(-)}^{(m)}$ – пределы прочности при растяжении и сжатии материала m-й фазы $m=1,\ 2,\ \ldots,\ M,\ M+1,\ M+2,\ \ldots,\ M+N$.

Используя (1)–(4), получим предельные значения температурного воздействия для структурно-неоднородного материала

$$\Theta_H^{(\pm)}=\pm\min_{\substack{s=1,2,\ldots,M,\\ l=M+1,\ldots,M+N}}\left\{\left|\Theta_{H(\pm)}^{(s)}\right|,\left|\Theta_{H(\pm)}^{(l)}\right|\right\} \tag{5}$$

(при этом отдельно находить, когда везде «+» и соответственно «–»), где

$$\Theta_{H(\pm)}^{(m)}=\frac{-b_t^{(m)}\pm\sqrt{\left(b_t^{(m)}\right)^2+4\sigma_{(-)}^{(m)}\sigma_{(+)}^{(m)}a_t^{(m)}}}{2a_t^{(m)}} \tag{6}$$

$$\left(m=1,2,\ldots,M,M+1,M+2,\ldots,M+N\right),$$

$$a_t^{(s)}=\sum_{j=1,3}\left(\Psi_{jt}^{(s)}\right)^2+\left(\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(1)}\right)^2-\Psi_{1t}^{(s)}\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(1)}-\Psi_{1t}^{(s)}\Psi_{3t}^{(s)}-\Psi_{3t}^{(s)}\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(1)},$$

$$b_t^{(s)}=\left(\sigma_{(-)}^{(s)}-\sigma_{(+)}^{(s)}\right)\left(\sum_{j=1,3}\Psi_{jt}^{(s)}+\tilde{\mathrm{B}}_{2t}^{(1)}\right)\ (s=1,\ 2,\ \ldots,\ M); \tag{7}$$

$$a_t^{(l)}=\sum_{j=2,3}\left(\Psi_{jt}^{(l)}\right)^2-\Psi_{2t}^{(l)}\Psi_{3t}^{(l)},$$

$$b_t^{(l)}=\left(\sigma_{(-)}^{(l)}-\sigma_{(+)}^{(l)}\right)\sum_{j=2,3}\Psi_{jt}^{(l)}\ \ (l=M+1,\ M+2,\ \ldots,\ M+N). \tag{8}$$

Таким образом, при $\Theta\in\left(\Theta_H^{(-)};\ \Theta_H^{(+)}\right)$ композитный материал остается упругим.

Соотношения (5)–(8) позволяют исследовать границы допустимых значений температурного воздействия $\Theta_H^{(-)},\Theta_H^{(+)}$ в зависимости от структуры композита, механических и теплофизических свойств материалов фаз. Следует отметить, что предложенный подход дает возможность определять и тип начального разрушения (т. е. вследствие разрушения какой фазы начинается разрушение композита) для каждого вида структурно-неоднородного материала.

2. Численное исследование влияния различных параметров композита на предельные значения температурного воздействия

В целях конкретизации рассмотрим различные трехфазные композиты следующей структуры:

$$\begin{aligned} &\text{A)}\ \ M=1,\ \ N=2\ \ (s=1;\ \ l=2,3);\\ &\text{B)}\ \ M=2,\ \ N=1\ \ (s=1,2;\ \ l=3); \end{aligned} \tag{9}$$

A) – одна продольная фаза и две поперечные; B) – две продольные фазы и одна поперечная, при этом удельное объемное содержание фаз равно:

$$\begin{aligned} &1)\ \ \tilde{\omega}_1=0,3;\ \ \tilde{\omega}_2=0,5;\ \ \tilde{\omega}_3=0,2;\\ &2)\ \ \tilde{\omega}_1=0,4;\ \ \tilde{\omega}_2=0,1;\ \ \tilde{\omega}_3=0,5. \end{aligned} \tag{10}$$

На рис. 2–5 приведены численные результаты для двух наборов физико-механических параметров трехфазных материалов:

$$\begin{aligned} &\bar{E}^{(1)}=2,\ \ \bar{E}^{(2)}=1,\ \ \bar{E}^{(3)}=0,05;\\ &\bar{\sigma}^{(1)}_{(+)}=0,3;\ \ \bar{\sigma}^{(2)}_{(+)}=1;\ \ \bar{\sigma}^{(3)}_{(+)}=0,025;\\ &\bar{\sigma}^{(1)}_{(-)}=1,5;\ \ \bar{\sigma}^{(2)}_{(-)}=0,5;\ \ \bar{\sigma}^{(3)}_{(-)}=0,05;\\ &\bar{\alpha}^{(1)}_{t}=\bar{\alpha}^{(2)}_{t}=1;\ \ \bar{\alpha}^{(3)}_{t}=17;\\ &\nu^{(1)}=0,15;\ \ \nu^{(2)}=0,25;\ \ \nu^{(3)}=0,385; \end{aligned} \tag{11}$$

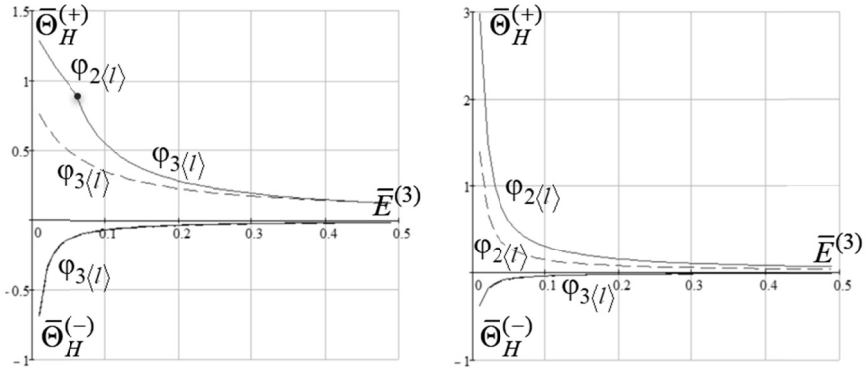
(композит типа: стеклянные волокна, стеклянная микродробь, полиэфирное связующее) и

$$\begin{aligned} &\bar{E}^{(1)}=5\ \ \bar{E}^{(2)}=1,\ \ \bar{E}^{(3)}=0,65;\\ &\bar{\sigma}^{(1)}_{(+)}=300;\ \ \bar{\sigma}^{(2)}_{(+)}=1;\ \ \bar{\sigma}^{(3)}_{(+)}=0,25;\\ &\bar{\sigma}^{(1)}_{(-)}=150;\ \ \bar{\sigma}^{(2)}_{(-)}=3,2;\ \ \bar{\sigma}^{(3)}_{(-)}=0,8;\\ &\bar{\alpha}^{(1)}_{t}=1,7;\ \ \bar{\alpha}^{(2)}_{t}=1;\ \ \bar{\alpha}^{(3)}_{t}=1,6;\\ &\nu^{(1)}=0,2;\ \ \nu^{(2)}=0,125;\ \ \nu^{(3)}=0,34; \end{aligned} \tag{12}$$

(композит типа: нержавеющая сталь, гранит, бетон).

В (11), (12) введены соответственно следующие безразмерные величины: модули Юнга $\bar{E}^{(m)}=\dfrac{E^{(m)}}{E^{(2)}}$, пределы прочности $\bar{\sigma}^{(m)}_{(\pm)}=\dfrac{\sigma^{(m)}_{(\pm)}}{\sigma^{(2)}_{(+)}}$ и коэффициенты линейного теплового расширения $\bar{\alpha}^{(m)}_{t}=\dfrac{\alpha^{(m)}_{t}}{\alpha^{(2)}_{t}}$ $\left(m=1,2,3\right)$. Численные значения параметров в (11), (12) взяты из [8, 9].

Исследование границ предельных значений температурного воздействия $\bar{\Theta}_H^{(\pm)} = \Theta_H^{(\pm)} \dfrac{E^{(2)}}{\bar{\sigma}_{(\pm)}^{(2)}} \alpha_t^{(2)}$ в зависимости от относительного модуля Юнга материала третьей фазы $\bar{E}^{(3)}$ приведены на рис. 2, 3, а от коэффициента $\bar{\alpha}_t^{(3)}$ – на рис. 4, 5. При этом рассмотрены типы структур А) и В) из (9), на графиках сплошные линии соответствуют удельному объемному содержанию фаз 1) из (10), а штриховые линии – 2) из (10). Около гладких участков кривых знаком $\varphi_{i\langle k\rangle}$ обозначены тип и номера фаз, по которым происходит начало разрушения: i указывает номер фазы, k – ее тип ($k = s$ соответствует продольной фазе, $k = l$ – поперечной). Угловые точки графиков соответствуют началу разрушения двух фаз.



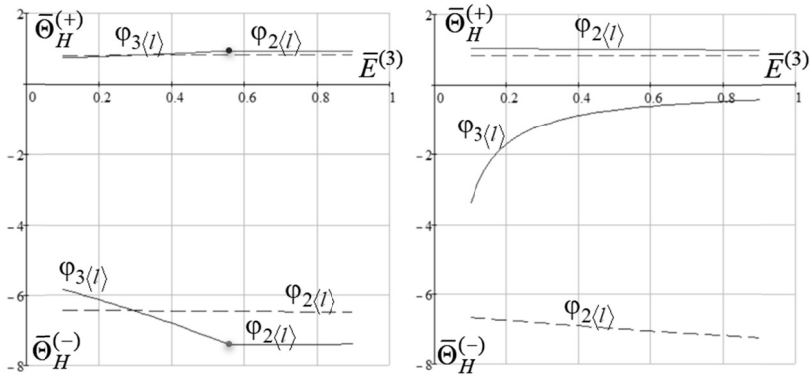
а *б*

Рис. 2 – Зависимость $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ от значения $\bar{E}^{(3)}$ для набора параметров (11):

а – одна продольная, две поперечные фазы; *б* – две продольные, одна поперечная фазы

Fig. 3 – Dependence of $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ on the value $\bar{E}^{(3)}$ for the set of parameters (11):

a – 1 longitudinal, 2 transverse phases; *b* – 2 longitudinal, 1 transverse phases



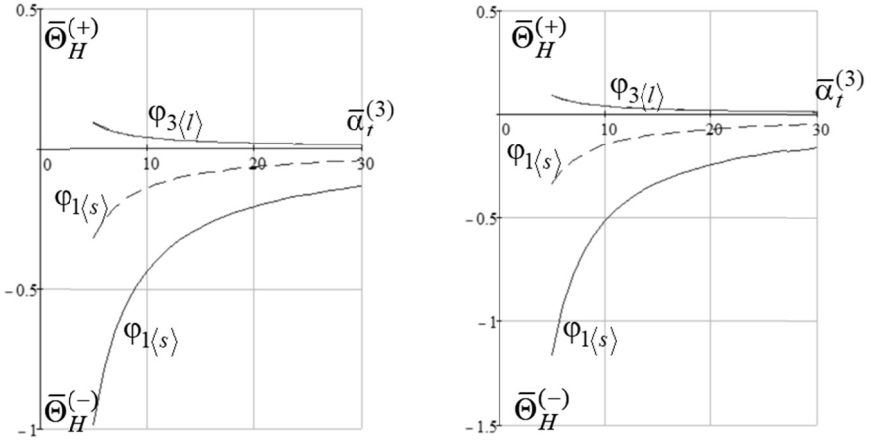
а *б*

Рис. 3. – Зависимость $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ от значения $\bar{E}^{(3)}$ для набора параметров (12):

а – одна продольная, две поперечные фазы; *б* – две продольные, одна поперечная фазы

Fig. 3. – Dependence of $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ on the value $\bar{E}^{(3)}$ for the set of parameters (12):

a – 1 longitudinal, 2 transverse phases; *b* – 2 longitudinal, 1 transverse phases



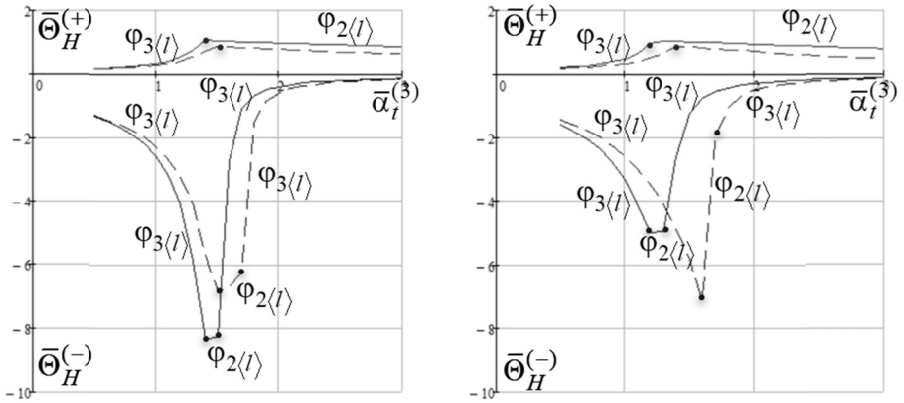
а *б*

Рис. 4 – Зависимость $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ от значения $\bar{\alpha}_t^{(3)}$ для набора параметров (11):

а – одна продольная, две поперечные фазы; *б* – две продольные, одна поперечная фазы

Fig. 4 – Dependence of $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ on the value $\bar{\alpha}_t^{(3)}$ for the set of parameters (11):

a – 1 longitudinal, 2 transverse phases, *b* – 2 longitudinal, 1 transverse phases



а *б*

Рис. 5 – Зависимость $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ от значения $\bar{\alpha}_t^{(3)}$ для набора параметров (12):

а – одна продольная, две поперечные фазы; *б* – две продольные, одна поперечная фазы

Fig. 5 – Dependence of $\bar{\Theta}_H^{(-)}, \bar{\Theta}_H^{(+)}$ on the value $\bar{\alpha}_t^{(3)}$ for the set of parameters (12):

a – 1 longitudinal, 2 transverse phases; *b* – 2 longitudinal, 1 transverse phases

Разработанный подход на основе математической модели для материалов с внутренней структурой позволяет определять границы температурного воздействия до начала разрушения композита. Полученные результаты позволяют определять параметры композита, при которых интервал предельных температурных воздействий является наибольшим, и дают возможность оценивать эксплуатационные свойства различных композитных материалов при термическом воздействии в зависимости от структуры композита и физико-механических свойств фазовых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Резников Б.С., Шеремет О.В.** Прогнозирование предельного состояния сред неоднородной структуры при термомеханическом воздействии // Актуальные вопросы строительства: IX научно-техническая конференция, 5–7 апреля 2016 г. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – С. 11.
2. **Reznikof B.S., Sheremet O.V.** Analysis of the influence of the temperature effect at the state of the initial destruction of layered composites // 11 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016): proceedings, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Pt. 1. – P. 47–49.
3. **Резников Б.С., Никитенко А.Ф., Кучеренко И.В.** Прогнозирование макроскопических свойств структурно-неоднородных сред. Сообщение 1 // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 2. – С. 10–17.
4. **Резников Б.С., Гобыш А.В.** Прогнозирование структуры многофазных размеростабильных композитов при температурном воздействии // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 3-й Всероссийской конференции. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2014. – С. 345–352.
5. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977. – 400 с.
6. **Немировский Ю.В., Резников Б.С.** Прочность элементов конструкций из композитных материалов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 166 с.
7. **Баландин П.П.** К вопросу о гипотезах прочности // Вестник инженеров и техников. – 1937. – № 1. – С. 19–24.
8. **Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П.** Справочник по физике. – Киев: Наукова думка, 1986. – 558 с.
9. **Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А.** Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. – Рига: Зинатне, 1971. – 238 с.

THE INFLUENCE OF THE INTERNAL STRUCTURE OF THE COMPOSITE AT THE BOUNDARIES OF THE LIMIT VALUES OF THE TEMPERATURES

B.S. Reznikov, O.V. Sheremet
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper considers the calculation of the boundaries of the permissible temperature effects for materials with internal structure depending on the number of elements of the composition, their location in space, the specific volume content and physical and mechanical properties of phase materials. The rational parameters of the composite structure and mechanical characteristics of the elements of the composition are indicated, at which the highest values of the temperature effect are achieved before the destruction.

Keywords: microinhomogeneous materials, stationary thermal resistance, effective thermal properties, structural condition of strength, limit state of the composite.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-72-79

REFERENCES

1. Reznikov B.S., Sheremet O.V. [Prediction of limit state environments of heterogeneous structure during thermomechanical influence]. *Aktual'nye voprosy stroitel'stva: IX nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [IX scientific and technical conference "Topical issues of construction"], Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2016, p. 11. (In Russian).
2. Reznikof B.S., Sheremet O.V. Analysis of the influence of the temperature effect at the state of the initial destruction of layered composites. *11 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016)*, Novosibirsk, NSTU, 2016, pt. 1, pp. 47–49.
3. Reznikov B.S., Nikitenko A.F., Kucherenko I.V. Prognozirovanie makroskopicheskikh svoistv strukturno-neodnorodnykh sred. Soobshchenie 1 [Determination technique of macroscopic properties of structurally nonhomogeneous environments]. *Izvestiya vysshikh*

uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo – News of higher educational institutions. Construction, 2008, no. 2, pp. 10–17.
4. Reznikov B.S., Gobysh A.V. [Prediction of the structure of multiphase size-stable composites under temperature influence]. *Problemy optimal'nogo proektirovaniya sooruzhenii: doklady 3-i Vserossiiskoi konferentsii* [Reports 3th All-Russian Conference "Problems of optimal design of facilities"]. Novosibirsk, NGASU Publ., 2014, pp. 345–352. (In Russian).
5. Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of micro-inhomogeneities environments]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 400 p.
6. Nemirovskii Yu.V., Reznikov B.S. *Prochnost' elementov konstruktsii iz kompozitnykh materialov* [Composite construction element resistance]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 166 p.
7. Balandin P.P. K voprosu o gipotezakh prochnosti [On the question of strength hypotheses]. *Vestnik inzhenerov i tekhnikov – Bulletin of engineers and technicians*], 1937, no. 1, pp. 19–24.
8. Dubrovskii I.M., Egorov B.V., Ryaboshapka K.P. *Spravochnik po fizike* [Physics handbook]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 558 p.
9. Skudra A.M., Bulavs F.Ya., Rotsens K.A. *Polzuchest' i staticheskaya ustalost' armirovannykh plastikov* [Creep and static fatigue of reinforced plastics]. Riga, Zinatne Publ., 1971. 238 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Резников Борис Самуилович – родился в 1944 году, д-р техн. наук, доцент профессор кафедры инженерной математики НГТУ. Область научных интересов: механика композиционных материалов и конструкций. Опубликовано 203 научных работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: reznikovbs@yandex.ru).

Reznikov Boris Samuilovich (b. 1944) – Doctor of Sciences (Eng.), associate Professor, Professor of Department of engineering mathematics Novosibirsk state technical University. His research interests are currently focused on the mechanics of composite materials and structures. He is author of 203 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: reznikovbs@yandex.ru).

Шеремет Оксана Владиславовна – родилась в 1972 году, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры инженерной математики НГТУ. Область научных интересов: прочность композиционных материалов. Опубликовано 16 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: sheremet@corp.nstu.ru).

Sheremet Oksana Vladislavovna (b. 1972) – Candidate of Sciences (Phys.&Math), Associate Professor of Department of engineering mathematics Novosibirsk state technical University. His research interests are currently focused on the strength of composite materials. He is author of 16 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sheremet@corp.nstu.ru)

Статья поступила 12 сентября, 2018
Received September 12, 2018

To Reference:

Reznikov B.S., Sheremet O.V. Vliyanie vnutrennei struktury kompozita na granitsy dopustimykh znachenii temperaturnogo vozdeistviya [The influence of the internal structure of the composite at the boundaries of the limit values of the temperatures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 72–79. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-72-79.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2019 апрель–июнь № 2 (43)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.13

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА НАГРЕВОВ ДВИГАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА НА БАЗЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА САМОЗАПУСКА

А.А. Шевченко, З.С. Темлякова, Д.М. Топорков
Новосибирский государственный технический университет

В статье предлагается метод оптимизации расчета нагревов частей активного объема крупных асинхронных двигателей с использованием устройства плавного пуска при определенных видах нагрузочных характеристик. Расчет нагревов обусловливается необходимостью определения степени старения изоляции и прогнозирования уменьшения срока службы электрической машины. Метод оптимизации расчета нагревов частей активного объема асинхронного двигателя базируется на автоматизации вычисления нагревов при моделировании процесса самозапуска двигателя после восстановления аварийного снижения напряжения сети. В то же время использование устройства плавного пуска подразумевает существенное проседание моментной характеристики двигателя. Данное явление, несмотря на снижение пусковых токов, явно сказывается как на времени запуска двигателя, так и на времени его дозапуска при выбеге ротора, соответственно на величине нагревов частей активного объема машины, вплоть до самой возможности запуска, что может вывести двигатель из строя и привести к аварии на ответственных производственных объектах. Предложена комплексная модификация алгоритма расчета токов и моментов, а также нагревов частей активного объема асинхронной машины при плавном пуске и автоматизация обработки массива данных расчета на конкретном примере асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, самозапуск, устройство плавного пуска, математическое моделирование, автоматизация, JavaScript.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-80-91

Введение

В современных регулируемых электромеханических системах все шире применяют плавный пуск асинхронных двигателей, для которого характерно уменьшение пускового тока и, как следствие, увеличение срока службы машины [1–4]. Несмотря на то что в современном производстве пуск двигателя все чаще осуществляется от преобразователя частоты (ПЧ), применение устройств плавного пуска (УПП) по сей день остается дешевой альтернативой и помогает избежать высоких нагрузок на сеть, а также слишком быстрого пуска. Последнее может привести к гидравлическим ударам, рывкам в механизме, обрыву транспортерных лент и т.д.

С помощью УПП обеспечивается приведение в соответствие с требованиями по эксплуатации количественных значений токов обмоток электрической машины и момента вращения ротора в течение пуска. Характерно, что ток обмотки статора двигателя пропорционален напряжению, а момент вращения пропорционален квадрату напряжения. Это означает, что в результате управления напряжением двигателя с помощью электронного УПП в ходе процесса пуска регулируется также потребляемый пусковой ток и создаваемый в двигателе начальный пусковой момент.

Также неотъемлемым требованием обеспечения автоматизированных производственных процессов является требование автоматического восстановления

© 2019 А.А. Шевченко, З.С. Темлякова, Д.М. Топорков

режима работы используемых в электрооборудовании асинхронных электродвигателей после кратковременного нарушения электроснабжения, которое сопровождается выбегом ротора. Под термином «выбег» подразумевается выход ротора из режима работы при номинальном скольжении в случаях снижения или отключения напряжения. Коротко физическая картина описывается следующим образом: при временном уменьшении подводимого напряжения в недопустимых пределах асинхронные двигатели ответственных механизмов не отключаются, а одновременно с восстановлением напряжения на шинах электроснабжающей установки они пускаются автоматически, без участия персонала. Тем самым технологический процесс производства не нарушается. Автоматическое восстановление работы электродвигателей при кратковременном нарушении электроснабжения принято называть самозапуском.

Короткие замыкания в сетях, вызывающие исчезновение либо снижение напряжения, как правило, кратковременны. В силу своих специфических особенностей роторы асинхронных двигателей не успевают остановиться, что обеспечивает продолжение технологического процесса производства. Однако с ростом скольжения ротор затормаживается, что сопровождается возрастанием тока в проводниках обмоток статора и ротора, что, в свою очередь, может привести к недопустимым перегревам и, как следствие, более быстрому старению изоляции. Из этого следует, что имеет место повышенная нагрузка электрической цепи питания. То есть цепь питания во время пуска двигателя должна быть рассчитана на более высокую нагрузку [5, 6].

1. Постановка задачи

Несмотря на то что при использовании УПП в случае аварийной ситуации самозапуск не осуществляется и двигатель перед следующим пуском должен быть остановлен полностью, алгоритм расчета нагревов при пуске с УПП схож с алгоритмом расчета нагревов при самозапуске. Соответственно автоматизация расчета пусковых нагревов при плавном пуске может основываться на алгоритме подсчета нагревов активных частей машины при дозапуске.

Реализация плавного пуска асинхронного двигателя рассматривается на примере высоковольтного асинхронного двигателя 5АЗМВ-3150/6000У2,5 производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО в сочетании с устройством тиристорного регулирования напряжения.

Решаемая задача сводится к следующему.

1. Модификация алгоритма расчета минимально возможного пускового тока, обеспечивающего режим гарантированного пуска, на основе ранее разработанного алгоритма расчета необходимых параметров при самозапуске двигателя.

2. Автоматизация расчета массива значений пусковых токов и моментов с целью уменьшения трудоемкости и времени расчета.

2. Расчет времени самозапуска

Процедура математического моделирования имеет разветвленный характер и состоит из нескольких блоков и подблоков. Перед расчетом нагревов токоведущих частей двигателя (обмотка статора, стержни и короткозамыкающие кольца ротора) необходимо вычислить время самозапуска. Для этого необходимы следующие исходные данные:

$P_{ном}$ – номинальная мощность, кВт;

$n_{ном}$ – синхронная частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

$J_{дв}$ – динамический момент инерции ротора, кг · м^2;

$J_{мех}$ – динамический момент инерции нагрузочного механизма, кг · м^2;

s – скольжение (набор значений), о.е.;

M^* – соответствующее скольжениям значение вращающего момента, о.е.

В качестве набора значений скольжений выбрана следующая числовая последовательность:

1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,15; 0,1; 0,05; значение $s_{кр}$,

где $s_{кр}$ – критическое значение скольжения.

Кроме того, необходимо задать статическую зависимость момента сопротивления механизма от скольжения $M_c(s)$, а также минимальное значение избыточного момента $M_{и\,min}$, о.е., время отсутствия напряжения $t_{U=0}$, с, и дискретность времени восстановления напряжения $t_{восст}$, с. Подробно задание приведенных выше параметров приведено в [7].

Из указанных исходных данных необходимо выделить следующие величины.

1. Начальное (α_1) и конечное (α_2) значения относительного снижения напряжения:

$$\alpha = \frac{U_п}{U_н},$$

где $U_п$ – величина напряжения просадки; $U_н$ – величина номинального значения напряжения.

2. $M_и$ – значение избыточного момента.

Расчет времени самозапуска состоит из двух основных подблоков. Смысл первого заключается в определении всех требуемых для расчета времени самозапуска величин, второго – в анализе удовлетворения требованиям условия самозапуска.

Дискретность времени восстановления (Δt, с) предопределяет точность расчета времени самозапуска. При расчете полагается, что отрезки $\alpha_1 \ldots \alpha_2$ и $0 \ldots t_{восст}$ изменяются линейно по закону $y = x$. Путем линейной интерполяции отрезок $\alpha_1 \ldots \alpha_2$ разбивается на число частей, соответствующее заданной дискретности, при этом каждому отрезку времени соответствует значение α_i.

Преобразованием дифференциального уравнения изменения момента из [4, 5] получена зависимость изменения времени выбега от скольжения:

$$\tau(s) = \frac{2\pi n_{ном}(J_{дв} + J_{мех})}{30} \int_0^1 \frac{ds}{M_{и.ср}(s)}.$$

Из данной зависимости, подставляя $\tau(s) = t_{U=0}$, находится скольжение выбега $s_{выб}$.

Далее, учитывая квадратичную зависимость между напряжением и моментом, программа находит избыточные моменты для каждого значения скольжения при всех имеющихся по результатам разбиения на отрезки величин α, после чего полученные результаты сводит в таблицу (табл. 1).

Аналогично высчитывается минимальное значение α_{min}, при котором физически возможен запуск/дозапуск асинхронного двигателя.

Далее согласно

$$\tau = kT \int_0^1 \frac{ds}{M_{и.ср}(s)}$$

высчитывается значение времени пуска для каждого значения α, при допущении, что данная величина относительного снижения напряжения постоянна для всего

периода времени работы двигателя. Эта формула содержит параметры k (коэффициент постоянной времени агрегата) и T (постоянная времени электродвигателя, с), которые определяются по методике из [5] следующим образом:

$$k = 1 + \frac{GD^2_{\text{мех}}}{GD^2_{\text{дв}}} = 1 + \frac{J_{\text{мех}}}{J_{\text{дв}}};$$

$$T = \frac{GD^2_{\text{дв}} n^2_{\text{ном}} 10^{-3}}{365 P_{\text{ном}}},$$

где

$$J = \frac{GD^2}{4};$$

$GD^2_{\text{дв/мех}}$ – маховый момент двигателя/механизма соответственно, кг · м^2; J – динамический момент инерции, кг · м^2.

Более подробное описание алгоритма подсчета времени самозапуска приведено в [7].

Таблица 1 / Table 1

Значения избыточных моментов

Values of excess torque

s	α_1	α_2	…	α_n
	t_1	t_2	…	t_n
s_1	$M_{и1.1}$	$M_{и2.1}$	…	$M_{ип.1}$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
s_{13}	$M_{и1.13}$	$M_{и2.13}$	…	$M_{ип.13}$

3. Расчет нагревов при самозапуске

Расчет нагревов при пуске производится по окончании определения всех отрезков времени и аналогичен процедуре определения времени самозапуска. Для расчета используются следующие данные:

$T_{\text{с/к}}$ – базовые нагревы стержней/колец, ºС;

v_1 – скорость нарастания температуры обмотки статора, ºС/с;

$p_{\text{с/к}}$ – относительные потери в стержнях/кольцах, соответствующие вышеуказанному набору значений скольжений, о.е.

По аналогии с расчетом времени пуска согласно [8] определяется нагрев обмотки статора

$$\theta_1 = \alpha^2 v_1 k T \int_0^1 \frac{ds}{M_{\text{и.ср}}(s)}.$$

Нагрев стержней/колец ротора:

$$\theta_{\text{с/к}} = \alpha^2 k T_{\text{с/к}} \int_0^1 \frac{p_{\text{с/к.ср}}(s)\, ds}{M_{\text{и.ср}}(s)}.$$

При расчете нагревов при самозапуске возникает сложность в части определения значений нагревов обмотки статора, стержней и короткозамыкающих колец ротора при «зависании ротора» асинхронного двигателя.

Известно, что минимальное значение избыточного момента $M_{\text{и.мин}}$, – это та минимальная разница между значениями вращающего момента электродвигателя M^* и момента сопротивления нагрузки $M_{\text{с}}$, при которой произойдет его гарантированный пуск/дозапуск. При математическом моделировании принято допущение, что при меньшем положительном значении избыточного момента произойдет «зависание ротора», т. е. вращение с постоянной угловой скоростью происходит до тех пор, пока напряжение обмотки статора не повысится до значения, обеспечивающего необходимый избыточный момент, и, как следствие, продолжение разгона ротора. Реальная физическая картина разгона продолжится и при снижении углового ускорения. При отрицательном избыточном моменте угловое ускорение примет соответственно отрицательное значение.

В качестве примера на рис. 1 дана графическая интерпретация зависимости избыточного момента в функции скольжения $M_{\text{с}}(s)$. Область избыточного момента $M_{\text{и}}$ получена как функция разности вращающего момента асинхронного двигателя и момента сопротивления нагрузки согласно [4].

$$M_u = M - M_c .$$

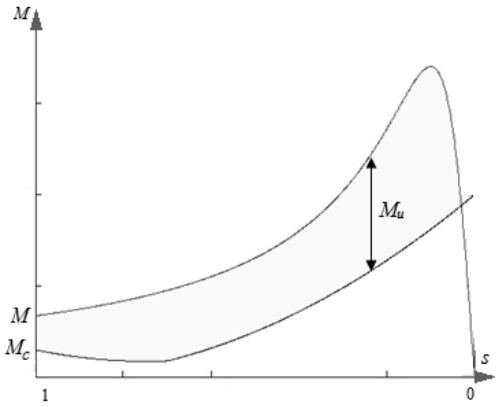


Рис. 1 – Моментные характеристики двигателя и нагрузочного механизма M, о.е., от скольжения s, о.е.

Fig. 1 – The motor torque and load mechanism characteristics M, r.u., versus slip s, r.u.

Следствием «зависания ротора» является значительное возрастание температур токоведущих частей из-за относительно продолжительного времени работы при скольжении, которому соответствует высокое значение тока обмотки статора. В данном случае, согласно [8]:

$$\theta_{1.\text{зав}} = \frac{j_1 I_i^* U_{\alpha\,\text{ср}} k_t t_{\text{зав}}}{198 U_{\text{ном}}} ,$$

$$\theta_{\text{с/к.зав}} = p_{\text{с/к}\,i} \frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}{2} \frac{P_{\text{ном}} t_{\text{зав}}}{C_{\text{с/к}} G_{\text{с/к}}} .$$

Здесь $t_{зав}$ – время «зависания», с; j_1 – плотность тока в обмотке статора, А/мм^2; $C_{с/к}$ – удельная теплоемкость материала стержней/колец, кДж/кг · ºС; $G_{с/к}$ – вес стержней/колец, кг; I^* – относительные пусковые токи, соответствующие скольжениям (набор значений), о.е.; $U_{\alpha ср}$ – средняя величина снижения напряжения, В; k_t – температурный коэффициент, о.е.; индекс «зав» означает искомую величину в режиме зависания.

Средняя величина снижения напряжения и температурный коэффициент:

$$U_{\alpha.ср} = U_{ном}\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2},$$

$$k_t = 1 + 0,004\left(t_p^{\circ} - 15^{\circ}\right).$$

Здесь t_p° – расчетная температура (зависит от класса изоляции).

Значения удельной теплоемкости используемых для изготовления токопроводящих частей асинхронных двигателях металлов приведены в [9]. Нагрев при разгоне от величины критического скольжения до величины номинального полагается на 0,1 ºС.

4. Принципы реализации плавного пуска

Принципы реализации плавного пуска подобны последовательности анализа выбега ротора, рассмотренного выше. В данном случае также обеспечивается постепенное изменение создаваемого в двигателе момента вращения.

В отличие от частотно-токового регулирования пуска и выбега ротора двигателя с использованием частотного преобразователя, при которых регулируется частота, в рассматриваемом случае частота тока обмотки статора остается постоянной и соответствует сетевой частоте.

На рис. 2 представлена зависимость фазного напряжения в функции времени при использовании тиристорного устройства плавного пуска, где за счет изменения величины α (значение которой указано ранее) изменяется величина напряжения на обмотке статора и, как следствие, величина тока и момента.

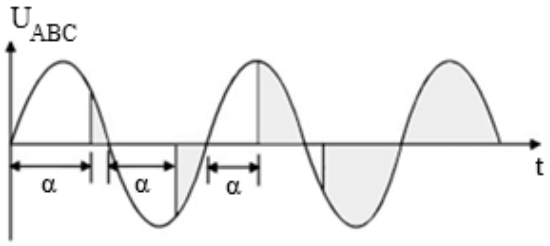


Рис. 2 – График зависимости фазного напряжения от времени

Fig. 2 – Phase voltage versus time graph

Следует отметить, что используемый в работе подход к расчету является упрощенным, так как при проведении электромагнитных расчетов полагается, что вместо «обрезанного» сигнала происходит соответствующее уменьшение амплитуды напряжения. Однако при равенстве среднеквадратичных значений напряжений амплитудные величины могут существенно разниться.

Для нахождения минимально допустимой уставки (величины минимально возможного пускового тока) при пуске, а также подсчета времени пуска и нагрева

обмотки статора, стержней и к/з колец ротора при автоматизированном расчете в процессе использования программного комплекса вводятся те же входные данные, что и ранее, с той разницей что:

1) исключаются входные величины $U_н$, j_1, $C_{с/к}$, $G_{с/к}$, t_p°;

2) дополнительно вводится величина номинального тока $I_н$.

Для значений скольжений приведена линейка стандартных величин по аналогии с расчетом самозапуска. Перед началом расчета необходимо также вывести зависимость статического момента сопротивления механизма от скольжения $M_с(s)$ [7].

Далее необходимо задать условия пуска машины. Здесь вводятся описанные выше величины α и $M_{и\,min}$ с той разницей, что для определения α величина $U_п$ будет являться не величиной напряжения просадки, а величиной «обрезанного» напряжения, подаваемого при пуске.

Дальнейший расчет автоматизирован.

5. Алгоритм работы программы

Программный комплекс реализован на языке программирования JavaScript. Ниже описаны особенности алгоритма работы программы.

Программа создает массив из n значений величин относительного снижения напряжения при пуске, начиная от введенной пользователем величины α до величины $\alpha = 1$ с дискретностью 0,01. Далее, учитывая квадратичную зависимость между напряжением и моментом, программа находит избыточные моменты для каждого значения скольжения на всем диапазоне $\alpha\ldots1$ для каждого значения α_i. По завершении построения двухмерного массива значений производится проверка величины избыточного момента при $s = 1$ для введенной величины α на выполнение условия $M_{и\,\alpha.s=1} \geq M_{и\,min}$. Отрицательный результат такой проверки будет означать, что пользователь подобрал слишком низкое значение α, недостаточное для создания необходимого избыточного момента и соответственно для запуска двигателя, о чем программа незамедлительно оповестит пользователя.

При выполнении заданного условия программа начинает удалять из построенного ранее двумерного массива значений избыточных моментов лишние наборы величин α_i по следующему алгоритму. Программа начинает проверять выполнение условия $M_{и\,i,j+1} \geq M_{и\,min}$, где i – значение α_i, j – значение s_j. При первом выполнении данного условия набор избыточных моментов для текущего α_i сохраняется в массиве. В случае, когда значение избыточного момента для очередного скольжения окажется ниже величины $M_{и\,min}$, происходит переход к следующему значению α. Если после перехода условие $M_{и\,i,j+1} \geq M_{и\,min}$ не выполняется, то происходит переход к следующему значению α, а набор избыточных моментов для оставленного α_i удаляется из массива.

По достижении величины $\alpha = 1$ расчет идет до номинального значения скольжения. В случае, если в последнем наборе избыточных моментов существует хотя бы одно отрицательное значение, машина не выйдет на номинальную скорость, о чем программа незамедлительно сообщит.

В случае, если на промежуточном дискретном значении α все оставшиеся величины избыточных моментов выше минимальной, полагается, что машина запустится уже на данной величине относительного снижения напряжения.

Сформировавшийся двумерный массив из m наборов значений избыточных моментов сводится в таблицу (см. табл. 1).

Также высчитывается минимальное значение α, при котором физически возможен запуск двигателя.

Дальнейший расчет времени запуска и величин нагревов происходит по принципу, описанному выше для самозапуска. Кроме этого, исходя из линейной зависимости тока и напряжения, производится расчет величин кратности пускового тока для каждого значения скольжения:

$$I^*_{\text{УПП}} = \alpha I^*_{\text{прям. пуск}},$$

где $I^*_{\text{УПП}}$ – относительное значение пускового тока с использованием УПП; $I^*_{\text{прям. пуск}}$ – относительное значение пускового тока при прямом пуске.

6. Результаты математического моделирования

Математическое моделирование плавного пуска, как указывалось выше, осуществлено на примере асинхронного двигателя 5АЗМВ-3150/6000У2,5 производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО в сочетании с устройством тиристорного регулирования напряжения.

Графическая интерпретация моментов и токов при прямом и плавном пусках показана на рис. 3, 4.

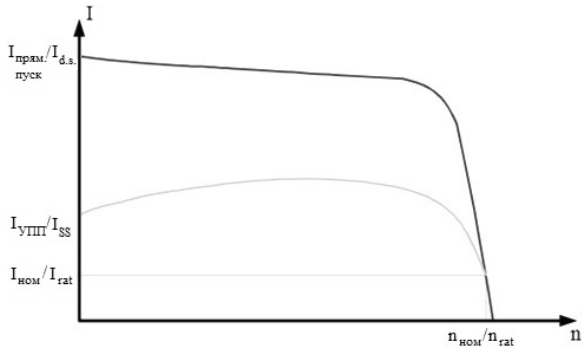


Рис. 3 – График зависимости относительной величины тока *I*, о.е., от частоты вращения *n*, об/мин

Fig. 3 – Relative current value *I*, r.u., versus speed *n*, rpm, graph

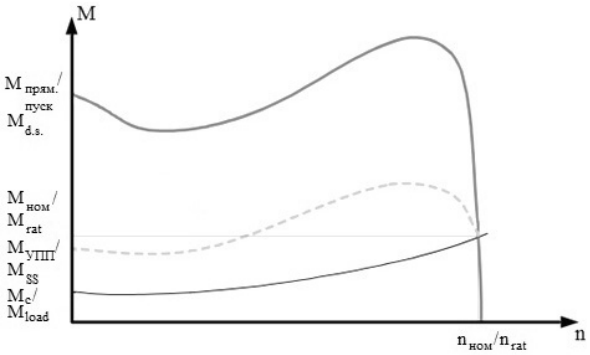


Рис. 4 – График зависимости относительной величины момента *M*, о.е., от частоты вращения *n*, об/мин

Fig. 4 – Relative torque value *M*, r.u., versus speed *n*, rpm, graph

Количественная характеристика значений моментов и токов представлена в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчета
Calculation results

P, кВт			3150		
U, В			6000		
n, об/мин			3000		
I_1, А			347		
s	$I_{прям.пуск}$	α	$I_{УПП}$	$M_{прям.пуск}$	$M_{УПП}$
о.е.					
1,00	7,06	0,68	4,80	0,80	0,37
0,90	7,00	0,68	4,76	0,80	0,37
0,80	6,90	0,68	4,69	0,80	0,37
0,70	6,80	0,68	4,62	0,82	0,38
0,60	6,75	0,68	4,59	0,84	0,39
0,50	6,65	0,70	4,66	0,87	0,43
0,40	6,56	0,74	4,85	0,95	0,52
0,30	6,50	0,76	4,94	1,10	0,64
0,20	6,15	0,76	4,67	1,30	0,75
0,15	5,85	0,76	4,45	1,45	0,84
0,10	5,50	0,76	4,18	1,60	0,92
0,05	4,75	0,76	3,61	2,00	1,16
$s_{кр}$ = 0,02	4,10	0,76	3,12	2,40	1,39

Характеристика нагрузочного момента имеет вид параболы с провалом [7, 9–11]. Пусковой нагрузочный момент составляет 2 кН · м, номинальный – 10 кН · м.

Составляется заключение о требуемой минимальной величине кратности пускового тока двигателя для внесенной пользователем величины относительного снижения напряжения при пуске α, время пуска и нагревы: пуск двигателя 5АЗМВ-3150/6000У2,5 возможен при питании от УПП при настройке не менее $4{,}95I_н$ (значение тока при пуске $I_п$ = 1718 А, максимально допустимое время пуска должно быть не более 25 с). Нагрев обмотки статора составит 21,7 °С, нагрев стержней – 139 °С, колец – 53,0 °С.

Заключение

1. На базе алгоритма расчета времени самозапуска и нагревов при нем разработана модификация алгоритма расчета токов при плавном пуске за счет изменения напряжения с использованием тиристорного устройства для заданной нагрузки. В модификации отражены особенности электромагнитного расчета при постоянной частоте тока обмотки статора. В то же время показана универсальность алгоритма расчета.

2. Алгоритм обработки массива значений пусковых токов и моментов при плавном пуске для заданной нагрузки автоматизирован и сведен в программный комплекс, что обеспечивает уменьшение трудоемкости и времени расчета. Одновременно с этим, учитывая особенности языка программирования JavaScript, конечный пользователь ситуативно имеет возможность удаленного доступа к разработанному программному продукту.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдберг О.Д.** Испытания электрических машин. – М.: Высшая школа, 2000. – 225 с.
2. **Вольдек А.И., Попов В.В.** Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.
3. **Архипцев Ю.Ф., Котеленев Н.Ф.** Асинхронные электродвигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 104 с.
4. **Чиликин М.Г., Сандлер А.С.** Общий курс электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
5. **Сыромятников И. А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
6. **Temlyakova Z.S., Shevchenko A.A., Grechkin V.V.** Investigation of operational properties of an induction motor based on numerical simulation // Electrical Engineering. Electrotechnology. Power engineering (EEE-2015): proceedings, Novosibirsk, 9–12 June 2015. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 79–82.
7. **Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S.** Large asynchronous machines self-running mode JavaScript-based computer-aided design // 11 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016): proceedings, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Pt. 2. – P. 133–135. – DOI: 10.1109/ifost.2016.7884210.
8. Heating calculation features at self-start of large asynchronous motor / A.A. Shevchenko, Z.S. Temlyakova, V.V. Grechkin, M.E. Vilberger // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – Art. 032039. – P. 1–6. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032039.
9. **Шевченко А.А., Темлякова З.С., Гречкин В.В.** Автоматизация расчета самозапуска двухскоростных асинхронных машин на основе применения языка программирования JavaScript // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды 7 Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2016. – С. 219–221.
10. Computer support for designing a high-voltage induction motor / V.V. Grechkin, M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, Z.S. Temlyakova // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85, iss. 12. – P. 740–742. – DOI: 10.3103/s1068371214120050.

MOTOR HEATING CALCULATION AUTOMATIZATION USING THE SOFT-STARTING DEVICE BASED ON THE SELF-STARTING CALCULATION ALGORITHM

Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Toporkov D.M.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article proposes a method for optimizing the calculation of the heating of large asynchronous motor active volume parts using a soft starter for certain types of load characteristics. The heating calculation is determined by the need to determine the insulation aging degree and predict a decrease in the service life of an electrical machine. The optimization method for calculating the heating of asynchronous motor active volume parts is based on automating the calculation of the heats when simulating the motor self-start process after the restoration the voltage in a network. At the same time, the use of a soft start device implies a significant subsidence of the motor torque characteristics. This phenomenon, despite the decrease in starting currents, clearly affects both the motor starting time and the starting-up time when the rotor has been running out, respectively, the machine active volume part heating amount up to the starting possibility which can damage the motor and lead to accidents at responsible production facilities. The algorithm comprehensive modification for calculating currents and torques, as well as asynchronous machine active volume heating parts with a soft-starter, and automating the calculation data array processing using a specific example of an asynchronous motor is proposed.

Keywords: asynchronous motor, self-start, soft starter, mathematical modeling, automation, JavaScript.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-80-91

REFERENCES

1. Gol'dberg O.D. *Ispytaniya elektricheskikh mashin* [Electrical machine testing]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 225 p.
2. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electrical machines. AC machines: the textbook for high schools]. St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 350 p.
3. Arkhiptsev Yu.F., Kotelenev N.F. *Asinkhronnye elektrodvigateli* [Asynchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 104 p.
4. Chilikin M.G., Sandler A.S. *Obshchii kurs elektroprivoda* [General course of electric drive]. Moscow, Energoizdat Publ.,1981. 576 p.
5. Syromjatnikov I. A. *Rezhimy raboty asinhronnyh i sinhronnyh dvigatelej* [Operation modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, 1984, 240 p.
6. Temlyakova Z.S., Shevchenko A.A., Grechkin V.V. Investigation of operational properties of an induction motor based on numerical simulation. *Electrical Engineering. Electrotechnology. Power engineering (EEE-2015)*. Novosibirsk, 2015, pp. 79–82.
7. Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S. Large asynchronous machines self-running mode JavaScript-based computer-aided design. *11 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016)*. Novosibirsk, 2016, pp. 133–135. DOI: 10.1109/ifost.2016.7884210.
8. Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Grechkin V.V., Vilberger M.E. Heating calculation features at self-start of large asynchronous motor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, art. 032039, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032039.
9. Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Grechkin V.V. [Automating the calculation of self-starting two-speed asynchronous machines based on the using JavaScript programming language]. *Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaya elektronika: trudy 7 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings 7th SPC. "Automated electric drive and industrial electronics"]. Novokuznetsk, 2016, pp. 219–221. (In Russian).
10. Grechkin V.V., Persova M.G., Soloveichik Y.G., Temlyakova Z.S. Computer support for designing a high-voltage induction motor. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, iss. 12, pp. 740–742. DOI: 10.3103/s1068371214120050.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевченко Андрей Александрович – родился в 1992 году, аспирант кафедры ЭМ НГТУ. Область научных интересов: автоматизация производственных процессов. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: comrade.zed92@gmail.com).

Shevchenko Andrei Alexandrovich (b. 1992) – post-graduate student at the Department of Electromechanics in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automation of production processes. He is author of more than 10 scientific papers. (Address: Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: comrade.zed92@gmail.com).

Темлякова Зоя Савельевна – родилась в 1949 году, д-р техн. наук, профессор кафедры ЭМ НГТУ. Область научных интересов: электромеханические системы. Опубликовано более 60 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: temlikova@edu.nstu.ru).

Temlyakova Zoya Savelyevna (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), professor in Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on electromechanical systems. She is author of more than 60 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: temlikova@edu.nstu.ru).

Топорков Дмитрий Михайлович – родился в 1988 году, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМ НГТУ. Область научных интересов: вопросы проектирования электрических машин. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).

Toporkov Dmitriy Mihailovich (b. 1988) – Candidate of Sciences (Eng.), associated professor in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on issues of electrical machines designing. He is author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 29 мая 2019 г.
Received May 29, 2019

To Reference:

Shevchenko A.A., Temlyakova Z.S., Toporkov D.M. Avtomatizatsiya rascheta nagrevov dvigatelya s primeneniem ustroistva plavnogo puska na baze algoritma rascheta samozapuska [Motor heating calculation automatization using the soft-starting device based on the self-starting calculation algorithm]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 80–91. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-80-91.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 2(43) апрель–июнь 2019

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 19.06.2019. Выход в свет 20.06.2019. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 8,05. Печ. л. 5,75. Изд. № 176. Заказ № 1262

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