Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ» 2020. Том 28. № 3

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор серии Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)
Отв. секретарь серии И.Г. Минакова

Редакционная коллегия:
А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)
E. Baake (проф., Германия)
В.И. Батищев (д.т.н., проф.)
Л.С. Зимин (д.т.н., проф.)
Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)
О.С. Колосов (д.т.н., проф.)
П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)
В.И. Лачин (д.т.н., проф.)
М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)
S. Lupi (проф., Италия)
B. Nacke (проф., Германия)
С.П. Орлов (д.т.н., проф.)
Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)
Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)
В.К. Тян (д.т.н., проф.)
M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2020. Том 28. №3)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Редактор Г.В. З а г р е б и н а
Компьютерная верстка И.Г. М и н а к о в а

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус

Телефон: (846) 337 03 42
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Подписано в печать 9.10.20
Выход в свет 10.11.20

Формат 70 × 108 $^{1}/_{16}$.
Усл. печ. л. 20,4 п.л.
Уч.-изд. л. 19,8 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 185/20.
Заказ № 485

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.09.00 – Электротехника.
Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (http://elibrary.ru)
и на сайте https://journals.eco-vector.com/1991-8542/

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2020
© Самарский государственный технический университет, 2020

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1

Цена свободная

Vestnik of Samara State Technical University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series 2020. Vol. 28. Issue 3

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chif of Series E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)
Execuite Secretary of Series I.G. Minakova

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)
E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)
V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)
L. S. Zimin L.S. (Dr. Techn. Sci., Prof.)
L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci., Prof., South Ural State University)
O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow Power Engineering Institute)
P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)
V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof., South-Russian State Technical University (NPI))
M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)
S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)
B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)
S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)
L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow State Mining University)
Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)
V.K. Tian (Dr. Techn. Sci., Prof.)
M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

Edited by G. V. Z a g r e b i n a

Compiled and typeset by I . G . M i n a k o v a

The Editorial Board Address:

Dept. of Automatic and Control in Technical Systems

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 03 42

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (http://www.viniti.ru) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU and by the site SamGTU (http://vestnik-teh.samgtu.ru)
and by the site https://journals.eco-vector.com/1991-8542/

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Верещагина С.С. Разработка иерархических функциональных моделей процесса диагностирования асинхронных электродвигателей с использованием методологии IDEF0……... 6

Гнутов М.С., Сизоненко А.Б. Методика распределения задач защиты информации между вычислительными устройствами автоматизированных систем на основе метода ветвей и границ……. 24

Ковтун В.С. Когнитивная агрегативно-потоковая метамодель процесса управления полетом автоматического космического аппарата……... 35

Обухов А.Д., Сиухин А.А. Нейросетевой метод управления адаптивной системой имитации физических нагрузок…….. 61

Likhttsinder B.Ya. Bakay Yu.O. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control…… 75

Электротехника

Волобуев А.Н., Штеренберг А.М., Кузнецов П.К. Некоторые особенности взаимодействия квантов электромагнитного излучения с гравитационным полем и проблема гравитона…… 90

Данилушкин А.И., Животягин Д.А., Кибкало С.С., Сурков Д.В. Оптимизация электротехнологического комплекса для высокопроизводительных линий индукционного нагрева…… 110

Зубков Ю.В., Кауров С.Ю., Верещагин В.Е. Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания……. 125

Попов А.В. Оптимальное проектирование индукционного нагревателя для поверхностной закалки в условиях интервальной неопределенности параметров…….. 139

В порядке дискуссии

Лихтциндер Б.Я. О недостатках классификации систем массового обслуживания……. 155

doi: 10.14498/tech.2020.3.1

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.896

РАЗРАБОТКА ИЕРАРХИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ IDEF0*

С.С. Верещагина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Предлагается подход к диагностированию асинхронных электродвигателей на основе применения иерархических функциональных моделей, построенных с использованием методологии IDEF0, для комплексного учета влияния показателей качества электрической энергии. Приводится краткий анализ проблем диагностирования асинхронных электродвигателей, обосновывающий актуальность разработки новых методов и моделей диагностирования. Отличительная особенность предложенных иерархических функциональных диагностических моделей асинхронных электродвигателей состоит в формализованном представлении необходимых функций процесса с использованием методологии IDEF0. Это позволяет выявить основные потоки данных в процессе диагностирования, извлечь знания о процессе, а также вскрыть причинно-следственные связи отказов асинхронных электродвигателей, дополнив традиционные методы технической диагностики анализом соблюдения нормативных требований, регламентирующих качество электрической энергии. Приводится краткое описание разработанных методов, моделей и алгоритмов, а также результаты экспериментальных исследований, анализа эффективности предложенной методологии.*

Ключевые слова: *асинхронные электродвигатели, функциональные модели IDEF0, разнородные данные, иерархические продукционные правила, неоднородная когнитивная модель.*

Введение

В настоящее время асинхронные электродвигатели (АЭ) широко используются в насосном оборудовании, станках, компрессорах, транспортерах, вентиляторах и т. д. в таких крупнейших энергопотребляющих отраслях промышленности, как металлургическая, химическая, нефтегазовая, машиностроительная и другие. Несмотря на высокие эксплуатационные характеристики, АЭ часто

**Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-07-00195, № 19-08-00152.*

Светлана Сергеевна Верещагина, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии».

преждевременно выходят из строя из-за возможных повреждений: обрыва обмоток, дефектов изоляции, нарушения контактов и соединений и др., изменения показателей (параметров) качества электрической энергии (ПКЭ), износа деталей, а также нарушения правил технической эксплуатации. По этим причинам обычно выходит из строя 20–25 % от общего количества установленных на предприятии АЭ [1–3]. Отказы и сбои в работе АЭ приводят к нарушению технологического процесса; снижению пожаробезопасности, качества и количества выпускаемой продукции; возникновению аварийных ситуаций. В связи с этим актуальной является проблема обеспечения безопасности и высокой надежности функционирования АЭ [4, 5].

Для решения этой проблемы проводится диагностирование АЭ в процессе его эксплуатации с целью выявления и предупреждения возможного возникновения неисправностей и отказов, поддерживания эксплуатационных параметров в установленных пределах, а также прогнозирования технического состояния (ТС) АЭ, что позволяет снизить расходы на ремонт электродвигателя и увеличить срок его службы.

Однако такое диагностирование усложняется рядом проблем, а именно большим объемом разнородных данных, большим количеством контролируемых ПКЭ; ограниченностью доступной информации; отсутствием научно обоснованных диагностических решений [5–7]. В силу недостаточной эффективности традиционных методов диагностики и контроля для диагностирования АЭ разрабатываются различные диагностические модели и методы диагностики [8–11]. Следует отметить, однако, что, во-первых, методы основаны на использовании статистической (измерительной) информации, при этом игнорируется опыт и знания экспертов, во-вторых, не во всех методах учитывается информация о климатических условиях (перепады температур, грозы и др.), в-третьих, большинство методов и моделей основаны на механических источниках отказов и сбоев, при этом не учитывается влияние основных ПКЭ, хотя АЭ очень чувствительны к ним.

Постановка задачи

Для повышения надежности АЭ и обеспечения высокого уровня их отказоустойчивости необходимо разрабатывать и применять новые методы и модели диагностирования с использованием современных информационных технологий, позволяющих не только оценивать механические и электрические неисправности, вызывающие отказы и сбои АЭ, но и извлекать и использовать для диагностики АЭ знания, накопленные оперативным и ремонтным персоналом.

Автором предложен подход к диагностированию АЭ на основе иерархических функциональных моделей с использованием методологии IDEF0, учитывающий влияние основных диагностических параметров, ПКЭ дополнительно к традиционным диагностическим показателям АЭ.

Разработка иерархических функциональных моделей процесса диагностирования асинхронных электродвигателей

В настоящее время разработано большое количество методов моделирования, использование которых кроме решения основных функциональных задач дает накопление опыта и практических навыков персонала в ходе эксплуатации объекта, а также позволяет унифицировать созданные модели для взаимодействия между группами разработчиков и потребителей [12]. Важнейшими из таких подходов являются:

1) функциональный (методология *IDEF*0 (диаграммы *IDEF*0)). Главной особенностью данного подхода является принцип декомпозиции диаграмм, т. е. четкое структурирование, построение иерархических и взаимосвязанных диаграмм;

2) объектно-ориентированный (диаграммы *UML*). Этот подход использует объектную декомпозицию, при этом статическая структура системы описывается в терминах объектов и связей между ними, а поведение системы описывается в терминах обмена сообщениями между объектами.

Разработка полных и непротиворечивых иерархических функциональных моделей процесса диагностирования АЭ осуществляется с использованием методологии *IDEF*0, что позволяет подробно его описывать путем введения уровней детализации. При этом упрощается не только моделирование процесса диагностирования, но и понимание моделей из-за выдачи информации небольшими частями на каждой последующей диаграмме [13]. Это позволяет устранить неоднозначность описания, возникающего из постановок задач, связанных с диагностированием АЭ.

Общее представление о диагностировании АЭ показано на контекстной диаграмме (рис. 1). Из рис. 1 видно, что в качестве *входных данных* для выполнения функции «Диагностирование АЭ» предполагается использовать архивную информацию о состоянии АЭ. Результатом выполнения данной функции (*выходные данные*) являются: принятие решений о ТС АЭ, а также разработка рекомендаций по дальнейшей эксплуатации АЭ.

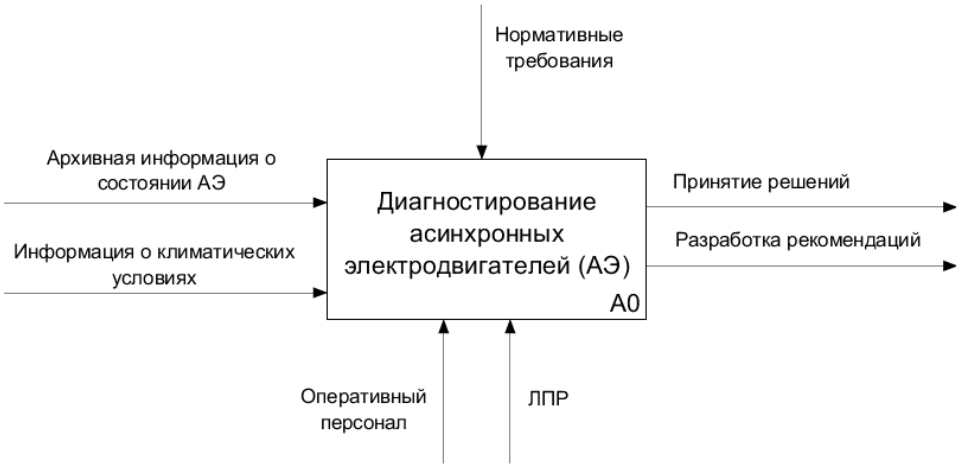


Рис. 1. Контекстная диаграмма «Диагностирование АЭ»

В качестве *управления* (регламентирования, ограничений) выступают нормативные требования (ГОСТы), где указаны условия эксплуатации, допустимые отклонения от номинальных значений основных параметров АЭ, основные КПЭ и т. п., а в качестве *механизма* – оперативный персонал, лицо, принимающее решение (ЛПР).

Далее на основе принципа иерархического упорядочивания с учетом задач, которые будут подробно рассматриваться в дальнейшем, детализируется контекстная диаграмма. Отметим, что подвергать декомпозиции функции моделей, представленных на диаграммах, можно до требуемого уровня.

На рис. 2 приведен результат декомпозиции контекстной диаграммы, предложенной автором и состоящей из шести функций А1-А6. Отметим, что предло-

женную диаграмму можно использовать для диагностирования большинства АЭ серии ВАО5К-450, -560, однако специфика конкретного АЭ учитывается в функциях А3 и А4, которая на диаграмме выделена жирным курсивом. Функции А3 и А4 осуществляются с использованием значений параметров конкретного АЭ.

Здесь стрелка «Требования и рекомендации» является туннельной и означает, что выраженные ею данные отсутствуют на контекстной диаграмме (см. рис. 1). При этом «Требования и рекомендации» поступают от ЛПР. Введение таких стрелок позволяет упростить описание модели, т. е. минимизировать загромождения диаграмм. Отметим, что первый уровень декомпозиции имеет довольно сложную структуру, поскольку диагностирование АЭ представляется многоуровневой *многоэтапной* процедурой.

Функция А1 – Выявление контролируемых параметров, факторов. Данная функция позволяет выявить:

1) основные диагностические параметры (технические характеристики АЭ), например, мощность, скольжение, ток статора, КПД, cos φ, температуру подшипников и корпуса и др., характеризующие АЭ (например, технические условия (ТУ) 16-510.532-76, ПБ, ГОСТ 22782.0-81, ГОСТ 22782.6-81 и ГОСТ 24719-81) [14–17];

2) основные ПКЭ (отклонение частоты, доза фликера (колебания), коэффициент *n*-й гармонической составляющей напряжения и др.) в соответствии ГОСТ 32144-2013 [18] в качестве возможных первоисточников отказов и сбоев АЭ;

3) диагностические факторы (например, информацию о климатических условиях), влияющие на основные параметры АЭ.

Также данная функция позволяет выявить связи между параметрами и факторами, которые необходимо контролировать на протяжении всего процесса диагностирования.

Функция А2 – Предварительное диагностирование АЭ. Данная функция позволяет провести предварительное диагностирование АЭ с использованием разработанного алгоритма поиска отклонений диагностических параметров АЭ, значений ПКЭ от норм, описанных в нормативных требованиях [18], которые хранятся в разработанной базе данных (БД) (рис. 3).

Например, для параметров «напряжение фаз *A, B, C*» согласно [18] доверительный интервал составляет [209, 231] В, предельный интервал [198, 231] В.

Функция «Получение результатов» осуществляет сбор всей информации по поиску отклонений значений ПКЭ от норм и выдает результат, например, в следующем виде: параметр «напряжение по фазам *A, B, C*» – дата и время отклонений по каждой фазе, продолжительность отклонений, среднее отклонение напряжений.

Блок-схема алгоритма поиска отклонений значений ПКЭ от норм, а также модели БД подробно рассмотрены в работе [19].

Функция А3 – Построение системы иерархических продукционных правил (ИПП). Эта функция составляет основу базы знаний (БЗ) и позволяет разрабатывать ИПП на основе групп параметров, факторов с учетом знаний и опыта оперативного персонала (рис. 4).

При разработке базы знаний (БЗ) важным является выбор способа представления знаний. Основные типы моделей представления знаний представлены в работах [20, 21].

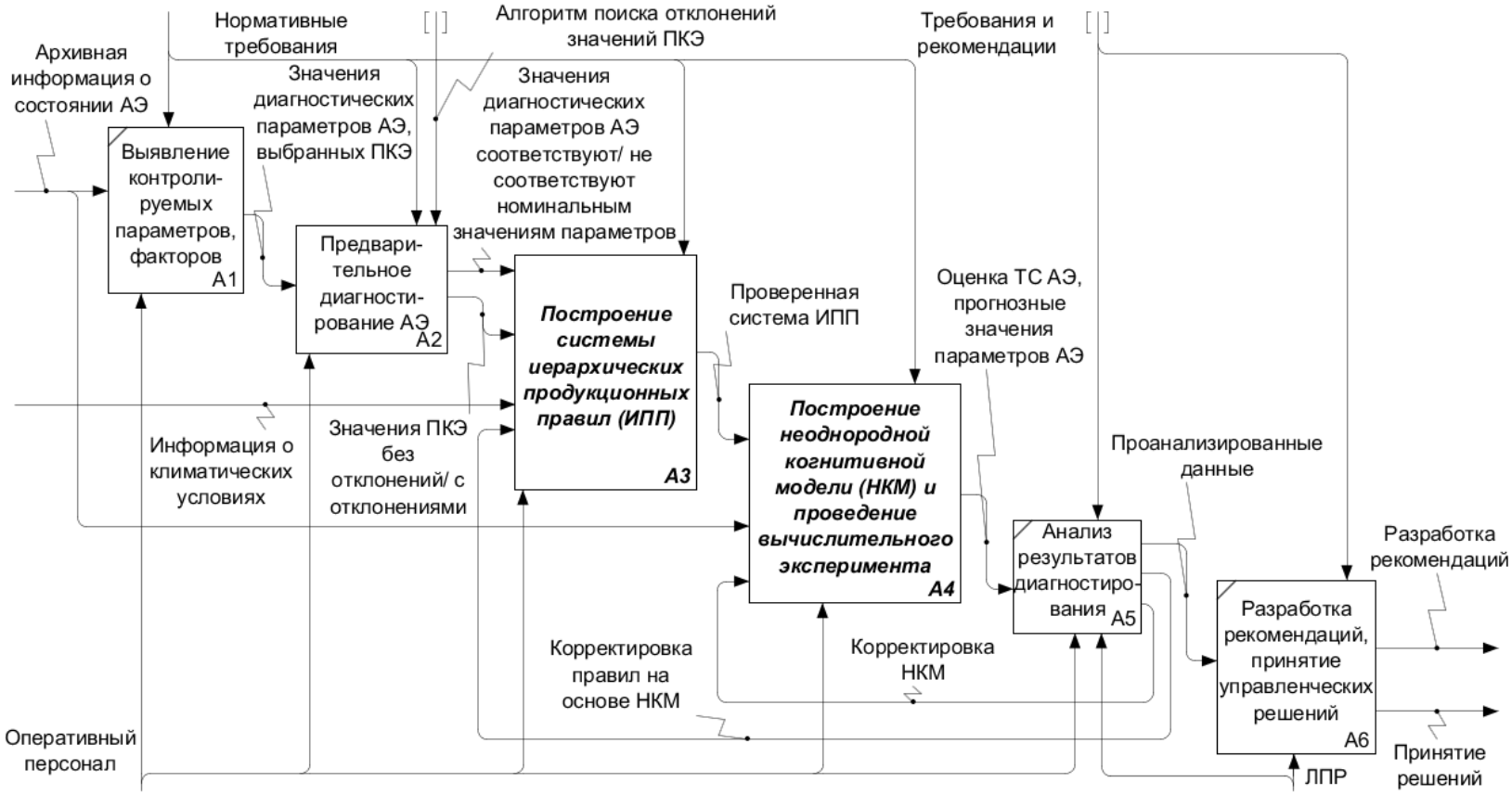


Рис. 2. Диаграмма декомпозиции «Диагностирование АЭ»

Рис. 3. Обобщенная диаграмма декомпозиции «Предварительное диагностирование по разделу диагностических параметров АЭ и ПКЭ»

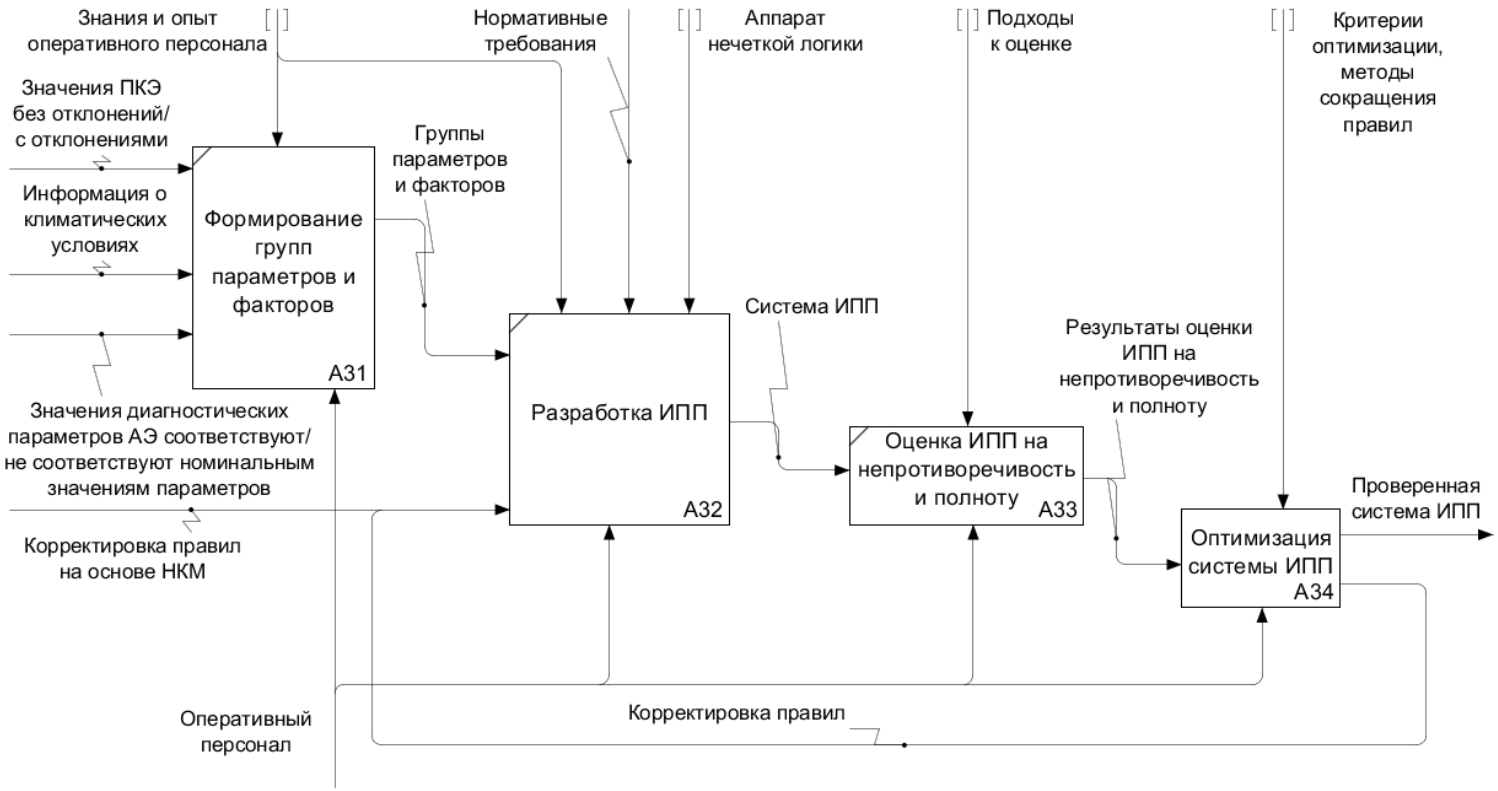


Рис. 4. Диаграмма декомпозиции «Построение системы ИПП»

В настоящей работе в качестве модели представления знаний предлагается использовать продукционные правила. Структура продукционного правила бывает нескольких типов, так как зависит от количества входных переменных в условиях и количества выходных переменных в заключениях [22]:

1) структура с одним входом и одним выходом (*Single Input – Single Output* (*SISO*));

2) структура со многими входами и одним выходом (*Multi Inputs – Single Output* (*MISO*);

3) структура со многими входами и многими выходами (*Multi Inputs – Multi Outputs* (*MIMO*).

Поскольку в рассматриваемом случае на ТС АЭ влияют множество групп параметров, факторов (входные переменные), а в качестве выхода выступает единственное решение (выходная переменная), то для разработки продукционных правил применяется *MISO*-структура (рис. 5).

На рис. 5 $\vec{x}_{\text{вх}_1}$, $\vec{x}_{\text{вх}_2}$, ..., $\vec{x}_{\text{вх}_k}$ – векторы входных параметров, факторов, значения которых можно изменять в определенных пределах, $k = \overline{1, c}$, влияющих на выходные параметры, факторы $x_{\text{вых}_1}$, $x_{\text{вых}_2}$, ..., $x_{\text{вых}_k}$, которые могут быть получены в перспективе; U_k – группы параметров, факторов, $U_k = \{U_1, U_2, \ldots, U_c\}$, $U_k = \{\vec{x}_{\text{вх}_k}, x_{\text{вых}_k}\}$, где $c < h$, h – общее количество параметров и факторов, которые наиболее полно описывают ТС АЭ. Методика формирования групп параметров и факторов подробно описана в работе [23].

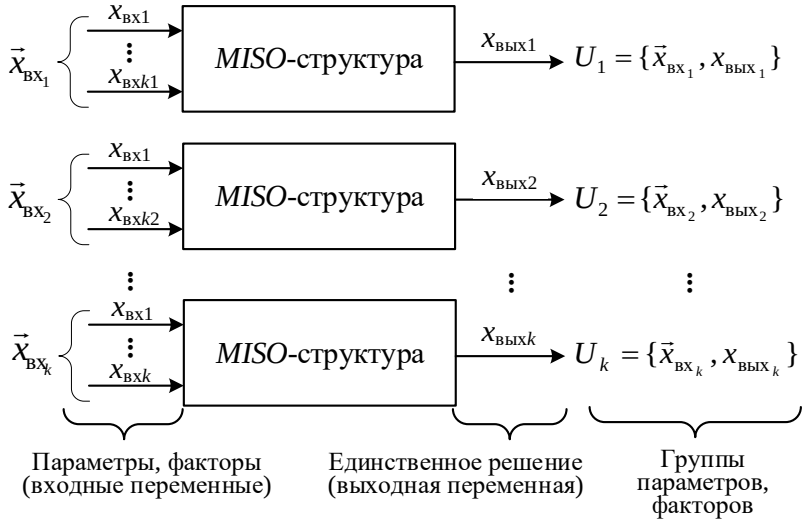


Рис. 5. *MISO*-структура для разработки продукционных правил

Для простоты входные параметры и факторы будем обозначать x, а выходные – y. Тогда модель продукционного правила с учетом *MISO*-структуры может быть представлена в виде [23]:

$$Rule_d : \text{Если } \underbrace{\underbrace{x_1 = A_{d1}}_{\text{чёткое значения}} \text{ и } \underbrace{x_2 = \tilde{A}_{d2}}_{\text{нечёткое значение}} \text{ и } \ldots \underbrace{x_h = \tilde{A}_{dh}([x_{h\min}, x_{h\max}])}_{\text{интервал}}}_{\text{входные переменные}}, \text{ то } \underbrace{\underbrace{y = B_{dc}}_{\text{четкое/нечеткое значение}}}_{\text{выходная переменная}} \quad [Rang_c],$$

где x_i – значения основных диагностических параметров, ПКЭ, факторов, $i = \overline{1;h}$;

A_i – четкое значение диагностических параметров, ПКЭ, факторов;

$\tilde{A}_i = \{x_i, \mu_{\tilde{A}_i}(x_i)\}$ – нечеткое значение диагностических параметров, ПКЭ, факторов, $\mu_{\tilde{A}_i}(x_i)$ – функция принадлежности значений диагностических параметров, ПКЭ, факторов;

$\tilde{A}_i([x_{i\min}, x_{i\max}])$ – значение диагностических параметров, ПКЭ, факторов представлено в виде интервала, где $x_{i\min}, x_{i\max}$ – минимальное и максимальное значение *i*-го диагностического параметра, ПКЭ, фактора;

y – значение результата по поводу исправности АЭ;

B – четкое и/или нечеткое значение результата,

Rang – значимость правила, которая устанавливается в соответствии с длиной правила (количество входных переменных в «*условиях*»), *Rang* ∈ {1, 2, … , *c*], *c* – количество продукционных правил.

Отметим, что чем длиннее продукционное правило, тем больший ранг оно имеет и тем ценнее правило для принятия диагностических решений.

Для диагностирования АЭ серии ВАО5К-450-315-2 оперативным персоналом на основе основных диагностических параметров, ПКЭ были составлены продукционные правила, фрагмент которых представлен ниже:

$Rule_1$: ЕСЛИ $x_{10} =< норма >$ И $x_{14} =< отсутствует >$ И

$x_{16} =< отсутствует >$, ТО $x_{19} =< исправное >$ [1],

$Rule_2$: ЕСЛИ $x_1 =< присутствует >$,

ТО $x_{19} =< исправное, но\ с\ небольшими\ отклонениями >$[5],

$Rule_3$: ЕСЛИ $x_9 =< низкое >$ И $x_{10} =< низкое >$ И $x_{11} < низкое >$,

ТО $x_{23} =< уменьшается >$[2],

$Rule_4$: ЕСЛИ $x_{23} =< уменьшается >$,

ТО $x_{19} = < исправное, но\ с\ небольшими\ отклонениями >$[6],

$Rule_5$: ЕСЛИ $x_9 =< высокое >$ И $x_{10} =< высокое >$ И

$x_{11} =< высокое >$, ТО $x_{25} =< увеличивается >$[3],

…

$Rule_d$: ЕСЛИ $x_{10} = 189$ И $x_{13} = -14$, ТО

$x_{19} =< исправное, но\ с\ небольшими\ отклонениями >$[4].

Здесь x_1 – отклонение частоты;

x_9 – напряжения фазы *C*;

v_{10} – напряжения фазы *A*;

x_{11} – напряжения фазы *B*;

x_{14} – размах изменения напряжения;

x_{16} – колебания напряжения;

x_{19} – исправность технического состояния АЭ;

x_{23} – коэффициент полезного действия;

x_{25} – момент на валу.

Под *корректировкой правил* понимается изменение количества входных параметров, факторов либо изменение терма-множества для какого-либо парамет-

ра, фактора. Под *корректировкой правил на основе* НКМ понимается добавление новых правил с учетом структуры модели (новых маршрутов).

Функция А4 – Построение неоднородных когнитивных моделей (НКМ) и проведение вычислительного эксперимента. Данная функция позволяет строить НКМ, а также проводить вычислительный эксперимент НМК на основе системы ИПП с участием оперативного персонала (рис. 6).

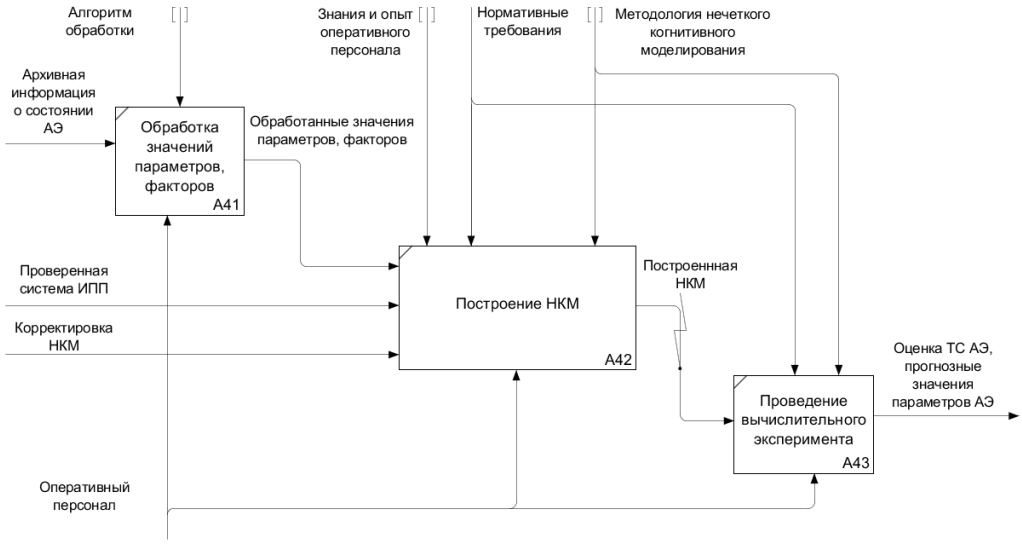


Рис. 6. Диаграмма декомпозиции
«Построение НКМ и проведение вычислительного эксперимента»

Поскольку оперативный персонал при диагностировании АЭ сталкивается с разнородными данными (численные значения отличаются единицами измерения и порядком величин), то необходима обработка этих данных [24] с целью проведения вычислительного эксперимента НКМ с использованием методологии нечеткого когнитивного моделирования.

Пока работа не ведется с НКМ как с математическим аппаратам, оперируем понятием «параметр» либо «фактор». Как только начинается работа с НКМ, то вводится понятие «вершина».

Под НКМ понимается ориентированный взвешенный граф, вершинами которого являются ПКЭ и факторы, влияющие на работу АЭ, а ребрами – нечеткие причинно-следственные связи между параметрами и факторами [24–26]. При этом значения вершин могут не только определяться на основе опыта оперативного персонала, измерительных приборов, но и вычисляться с помощью функций, которые сопоставлены вершинам и могут зависеть как от единственного *аргумента (от одной вершины), так и от нескольких переменных (нескольких вершин).*

На рис. 7 представлен локальный фрагмент НКМ диагностирования АЭ серии ВАО5К-450-315-2 на предприятии нефтяной промышленности.

Неоднородная когнитивная модель, представленная на рис. 7, состоит из следующих 28 вершин:

1) ПКЭ: x_1 – отклонение частоты, Δf, Гц; x_2 – длительность провала напряжения, Δt_n, с; x_3 – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, $К_{2U}$, %; x_4 – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, $К_{0U}$, %; x_5 – несимметрия напряжений; x_6 – доза фликера, P_{st};

x_7 – коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения, $К_{U(n)}$, %; x_8 – коэффициент временного перенапряжения; x_9 – напряжения фазы C, U_C, В; v_{10} – напряжения фазы A, U_A, В; x_{11} – напряжения фазы B, U_B, В; x_{12} – грозовые импульсные напряжения, $U_{имп}$, В; x_{13} – отклонение напряжения по фазам A, B, C, δU_v, %; x_{14} – размах изменения напряжения, δU_t, %; x_{15} – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, $К_U$, %; x_{16} – колебания напряжения; x_{17} – несинусоидальность напряжения), $К_{НС}$ [18];

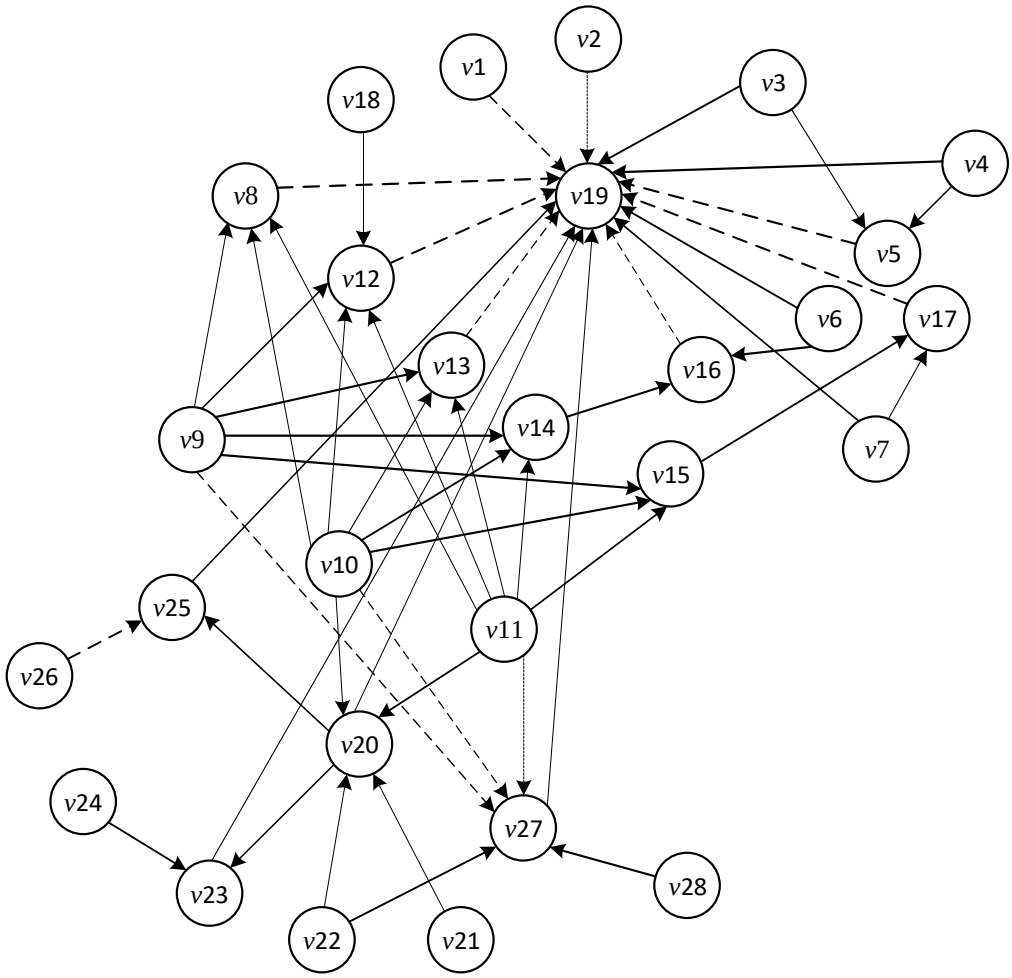


Рис. 7. Неоднородная когнитивная модель диагностирования АЭ серии ВАО5К-450-315-2

2) диагностические факторы: x_{18} – климатические условия; x_{19} – исправность технического состояния АЭ;

3) основные диагностические параметры: x_{20} – мощность потребления из сети, P_1, кВт; x_{21} – коэффициент мощности, cos φ; x_{22} – ток статора, I_1, А; x_{23} – коэффициент полезного действия, η; x_{24} – номинальная мощность, P_2, кВт; x_{25} – момент на валу, $М_2$, Нм; x_{26} – частота вращения, n; x_{27} – скольжение, s; x_{28} – сопротивление статорной обмотки, r_2, Ом [27].

Фрагмент описания основных диагностических параметров и факторов, влияющих на работу АЭ серии ВАО5К-450-315-2, представлен в табл. 1.

Для построения функций принадлежности лингвистических переменных $v_1, \ldots, v_{28}$ применяется метод экспертных оценок [28].

Здесь, например, зная значения вершин v_9 (U_C), v_{10} (U_A) и v_{11} (U_B), через функцию $K_{\text{пер}U} = \dfrac{U_{(ABC)\max}}{\sqrt{2}U_{\text{норм}}}$ можно вычислить значение в вершине v_8 и через функцию $\delta U_0 = \dfrac{U_{(ABC)} - U_{\text{норм}}}{U_{\text{норм}}}$, $U_{\text{норм}}$ = 220 В вычислить значение в вершине v_{13}.

Таблица 1

Описание ПКЭ и факторов, влияющих на работу АЭ серии ВАО5К-450-315-2

Обозначение	**Название лингвистической переменной (параметра, фактора)**	**Нормируемые значения, ед.изм. (по ГОСТу)**	**Метод /средство измерения**	**Терм-множество**
x_1	Отклонение частоты	Предельно допустимые ±0,4 Гц /Нормально допустимые ±0,2 Гц	Измерительный Прибор ПКЭ-А	Предельно допустимые /Нормально допустимые
x_8	Климатические условия	Отсутствие или присутствие дождя, грозы, обледенения	Визуально	Отсутствует /присутствует
…	…	…	…	…
x_{14}	Отклонение напряжения фаз А, В, С	±5% предпочительный диапазон ±10% предельный диапазон	Прибор ПКЭ-А, измерительные трансформато-ры, токоизме-рительные клещи	Предельно допустимые /Нормально допустимые
…	…	…	…	…
x_{19}	Исправность технического состояния АЭ	[80-100]%	Комплект приборов согласно ТУ, инструкции по эксплуатации, методы к оценке ТС АЭ	Исправное /Исправное, но с небольшими отклонениями /Неисправное
…	…	…	…	…
x_{27}	Скольжение, s	1,0 %	Тахогенератор	Норма
x_{28}	Сопротивление статорной обмотки, r_2	–	Комплект приборов согласно ТУ, инструкции по эксплуатации	Норма

Фрагмент матрицы отношений НКМ (см. рис. 7) представлен в виде табл. 2.

Таблица 2

Фрагмент матрицы отношений НКМ

	v_1	v_2	…	v_{11}	v_{12}	…	v_{18}	v_{19}	…	v_{20}	v_{28}
v_1	0	0	…	0	0	…	0	-0,3	…	0	0
v_2	0	0	…	0	0	…	0	-0,7	…	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
v_{11}	0	0	…	0	0	…	0	0	…	0,7	0
v_{12}	0	0	…	0	0	…	0	-0,5	…	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
v_{18}	0	0	…	0	0,7	…	0	0	…	0	0
v_{19}	0	0	…	0	0	…	0	0	…	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
v_{20}	0	0	…	0	0	…	0	0,7	…	0	0
v_{28}	0	0	…	0	0	…	0	0	…	0	0

Отметим, что для определения связей между параметрами и факторами, влияющими на работу АЭ, был проведен сбор и анализ знаний оперативного персонала в области диагностирования АЭ. Для установления причинно-следственных связей между параметрами и факторами (вершинами) определена шкала для оценки их характера (положительный или отрицательный) и силы связей (табл. 3) [24].

Таблица 3

Оценка характера и силы связей между вершинами, представленными в виде вербальных описаний

Вербальное описание	Численное значение
Отсутствует	0
Очень слабо усиливает Очень слабо ослабляет	[0,1, 0,3] [– 0,1, – 0,3]
Слабо усиливает Слабо ослабляет	[0,31, 0,5] [– 0,31, – 0,5]
Умеренно усиливает Умеренно ослабляет	[0,51, 0,7] [– 0,51, – 0,7]
Сильно усиливает Сильно ослабляет	[0,71, 0,9] [– 0,71, – 0,9]
Очень сильно усиливает Очень сильно ослабляет	[0,91, 1] [– 0,91, – 1]

Под *корректировкой НКМ* понимается добавление или удаление вершин; установление новых связей между вершинами; изменение значений вершин.

После построения НКМ проводится вычислительный эксперимент, который включает следующие системные задачи: анализ структуры НКМ (анализ циклов модели, поиск собственных чисел, анализ устойчивости процесса, анализ структурной устойчивости к возмущающим и управляющим воздействиям, топологический анализ структуры модели, расчет системных показателей НКМ (влияние факторов друг на друга)), а также импульсное моделирование и сценарный анализ для прогнозирования ТС АЭ [21, 26].

Результаты вычислительного эксперимента для АЭ серии ВАО5К-450-315-2 представлены в работе [26].

Функция А5 – Анализ результатов диагностирования. Данная функция позволяет проводить анализ полученных результатов диагностирования АЭ. Если результаты диагностирования АЭ у ЛПР вызывают сомнения, то он поручает персоналу задание, например, подкорректировать НКМ либо продукционные правила.

Функция А6 – Разработка рекомендаций и принятие диагностических решений. Данная функция позволяет разрабатывать рекомендации и принимать диагностические решения с учетом выявленных неисправностей при работе АЭ.

Исследование системы иерархических продукционных правил для диагностирования АЭ

В процессе разработки БЗ формируется огромное количество продукционных правил, при этом БЗ оказывается избыточной, что усложняет работу оперативного персонала по интерпретации результатов.

Например, в решаемой задаче БЗ содержала бы $N = 3^{11}*2^{17}*1^{5}$= 242 683 правил, поскольку на вход подается 11 параметров, каждый из которых содержит одинаковое число термов, равное трем, и 17 параметров – число термов, равное двум. При таком огромном числе правил процедура проверки непротиворечивости правил и корректности работы системы становится *неосуществимой* вообще. Поэтому число продукционных правил, с которыми работают реальные интеллектуальные системы, не превышает одной тысячи.

Для решения данной проблемы оперативному персоналу было предложено составить продукционные правила на основе своего опыта и знаний, описывающие всевозможные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации АЭ серии ВАО5К-450-315-2. В результате было получено 237 иерархических продукционных правил, на основе которых была построена НКМ (см. рис. 7), которая исследовалась с применением вычислительного эксперимента.

Таблица 4

Результаты сопоставления значений, полученных с/без применением разработанного программного обеспечения

№	Наименование фактора	Без применения ПС	С применением ПС
1	Время диагностирования АЭ (день)	14	9
2	Количество исполнителей, участвующих в диагностировании АЭ (чел.)	6	3

Для автоматизированного построения продукционных правил и работы с ними была разработана программная система (ПС) с использованием языка программирования *C#*. В табл. 4 приведены результаты сопоставления значений, полученных с/без применением разработанной ПС при диагностировании АЭ машиностроительного производства.

Заключение

В статье предлагается подход к диагностированию асинхронных электродвигателей на основе применения иерархических функциональных моделей, построенных с использованием методологии *IDEF*0 для комплексного учета влияния ПКЭ. Разработанные иерархические функциональные модели представлены в наглядной и доступной форме, тем самым показывая, какие функции необходимо выполнить для диагностирования АЭ. Выполнение предложенных функций позволяет обнаруживать на ранней стадии возникающие неисправности, предотвращать аварийные ситуации, приводящие к серьезным негативным последствиям. При этом модели обеспечивают возможность обмена информацией о рассматриваемом процессе с учетом нормированных требований на языке, понятном не только оперативному персоналу, но и ЛПР.

Разработанная система ИПП, полученная в результате ранжирования правил, отражает обобщенные знания оперативного персонала о работе конкретного АЭ, что позволяет уменьшить объем БЗ, содержащей продукционные правила, и принять научно обоснованные диагностические решения относительно исправности конкретного АЭ.

Разработанная ПС для автоматизированного построения продукционных правил и работы с ними, которая применялась при диагностировании АЭ серии ВАО5К-450-315-2 на одном из предприятий нефтяной промышленности, позволила сократить время проведения диагностирования АЭ в 1,6 раза и уменьшить количество исполнителей, участвующих в диагностировании, в 2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крупенин Н.В., Голубев А.В., Завидей В.И. Новые возможности в диагностике электрических машин // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 45–47.
2. Пономарев В.А., Суворов И.Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.news.elteh.ru/proect/neuron.php (дата обращения: 05.06.2020).
3. Баширов М.Г., Бахтизин Р.Н., Баширова Э.М., Миронова И.С. Система автоматизации управления техническим состоянием технологического оборудования нефтегазовых производств // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 3. – С. 26–40.
4. Лутай С.Н., Коломиец В.В., Кобылянский Б.Б, Булгакова И.В. Методы и анализ диагностики асинхронных электродвигателей // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 15 (91). – С. 306–310.
5. Бобров В.В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3. – С. 198–203.
6. Катасев А.С., Емалетдинова Л.Ю. Нечетко-продукционная каскадная модель диагностики состояния сложного объекта // Программные системы и вычислительные методы. – 2013. – № 1(2). – С. 69–81.
7. Балобанов Р.Н., Зацаринная Ю.Н. Особенности диагностирования высоковольтного оборудования с элегазовой изоляцией // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 2. – С. 257–258.
8. Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 61–69.

9. Куприянов И.С., Бельский И.О., Лукьянов А.В. Математическое моделирование параметров асинхронных двигателей при электрических дефектах ротора // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63. – № 3. – С. 154–163.
10. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – С. 127–137.
11. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Дмитриевский А.А., Казакбаев В.М. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 34–39.
12. Вендров А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 176 с.
13. Соколов Е.В., Костырин Е.В. Функциональная модель системы управления медицинскими диагностическими услугами // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2009. – № 3 [Электронный ресурс]. – URL: https://engineering-science.ru/doc/121943.html (дата обращения: 07.04.2020).
14. ГОСТ 22782.0-81 Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний (с Изменениями № 1, 2, 3) [Электронный ресурс]. URL: https://npopris.ru/wp-content/uploads/2015/04/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2-22782.0-81.pdf (дата обращения: 07.04.2020).
15. ГОСТ 22782.6-81 Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Взрывонепроницаемая оболочка». Технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс]. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/13834/ (дата обращения: 07.04.2020).
16. ГОСТ 24719-81 Электрооборудование рудничное. Изоляция, пути утечки и электрические зазоры. Технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс]. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/45673/ (дата обращения: 07.04.2020).
17. ТУ 16-526.553-84 Двигатели асинхронные типов ВА02-280, ВА02-315 и ВА02-355 [Электронный ресурс]. URL: http://www.laborant.ru/eltech/01/2/0/09-98.htm (дата обращения: 07.04.2020).
18. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
19. Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Алгоритм и программная реализация поиска отклонений значений параметров от норм промышленного оборудования // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – № 11. – С. 91–95.
20. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
21. Ковалев С.М., Колоденкова А.Е. Построение базы знаний интеллектуальной системы контроля и предупреждения рисковых ситуаций для этапа проектирования сложных технических систем // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7. – № 4 (26). – С. 398–409.
22. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
23. Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Разработка системы иерархических продукционных правил для диагностирования электротехнического оборудования // Онтология проектирования. – 2020. – Т. 10. – № 1(35). – С. 63–72.
24. Колоденкова А.Е. Моделирование процесса реализуемости проекта по созданию информационно-управляющих систем с применением нечетких когнитивных моделей // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 6 (144). – С. 10–17.
25. Ginis L.A., Gorelova G.V., Kolodenkova A.E. Cognitive and simulation modeling of Socioeconomic systems // Proceedings of the International Research Conference Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2017). – 2017. – Vol. 72. – P. 50–54.
26. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings, 2020. – P. 1–5.
27. Каталог электротехнической продукции. Росэнергомаш [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ventilator.kiev.ua/rozenberg/catalog.pdf (дата обращения: 05.06.2020).
28. Каид В.А.А. Методы построения функций принадлежности нечетких множеств // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 144–153.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2020 г.

DEVELOPMENT OF HIERARCHICAL FUNCTIONAL MODELS FOR DIAGNOSTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS USING IDEF0 METHODOLOGIES

S.S. Vereshchagina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper proposes an approach to diagnostics of asynchronous electric motors based on the application of hierarchical functional models that are built using the IDEF0 methodology for integrated consideration of the influence of electric power quality indicators. A brief analysis of the problems of diagnostics for asynchronous electric motors is given, which justifies the relevance of developing new methods and models of diagnostics. A distinctive feature of the proposed hierarchical functional diagnostic models of asynchronous electric motors is a formalized representation of the necessary process functions using the IDEF0 methodology. This allows one to identify the main data flows in the diagnosis process, extract knowledge about the process, and reveal the cause-and-effect relationships of failures of asynchronous electric motors, complementing traditional methods of technical diagnostics by analyzing compliance with regulatory requirements concerning the electrical energy quality. A brief description of the developed methods, models and algorithms, as well as the results of experimental research, efficiency analysis of the proposed methodology is provided.*

Keywords: *electrical equipment, IDEF0 functional models, measuring and expert information, hierarchical production rules, heterogeneous cognitive model.*

REFERENCES

1. Krupenin N.V., Golubev A.V., Zavidey V.I. New opportunities in diagnostics of electric machines // Electricity, 2011. No. 9. Pp. 45–47 (In Russian).
2. Ponomarev V.A., Suvorov I.F. Complex method of diagnostics of asynchronous electric motors based on the use of artificial neural networks // Electrical engineering news. 2011. № 2 (68). – URL: http://www.news.elteh.ru/proect/neuron.php (accessed June 05, 2020) (In Russian).
3. Bashirov M.G., Bakhtizin R.N., Bashirova E.M., Mironova I.S. Automation system for managing the technical condition of technological equipment for oil and gas production // Oil and Gas business, 2011. No. 3. Pp. 26–40 (In Russian).
4. Lutay S.N., Kolomiyets V.V., Kobyliansky B.B., Bylgakova I.V. Methods and analysis of diagnostics of asynchronous electric motors // Electrical and computer systems, 2014. No. 15 (91). Pp. 306–310 (In Russian).
5. Bobrov V.V. Evaluating the effectiveness of basic diagnostics methods for asynchronous motors // Polzunovskij vestnik, 2012. No. 3. Pp. 198–203 (In Russian).
6. Katasev A.S., Emaletdinova L.Y. Fuzzy-production cascade model for diagnosing the state of a complex object // Software systems and computational methods, 2013. Vol. 1. Pp. 69–81 (In Russian).
7. Balabanov R.N., Zatsarinnyi Yu.N. Peculiarities of diagnostics of high voltage equipment gas-insulated // Bulletin of Kazan technological University, 2015. No. 2. Pp. 257–258 (In Russian).
8. Lukyanov A.V., Mukhachev Yu. S., Belsky I.O. Investigation of the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors // Systems. Methods. Technologies, 2014. No. 2 (22). Pp. 61–69 (In Russian).
9. Kupriyanov I.S., Belskii I.O., Lukyanov A.V. Mathematical modeling of parameters of asynchronous motors with electric defects of the rotor // Modern Technologies. System Analysis. Modeling, 2019. Vol. 63. No. 3. Pp. 154–163 (In Russian).
10. Sidelnikov L.G., Afanasiev D.A. Overview of methods for monitoring the technical condition of asynchronous motors in operation // Bulletin of the Perm national research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining, 2013. No. 7. Pp. 127–137 (In Russian).
11. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A., Kazakbaev V.M. Diagnostics of induction motors based on spectral analysis of stator currents // Energy security and energy saving, 2014. No. 3. Pp. 34–39 (In Russian).

Svetlana S. Vereshchagina, Senior Lecture.

12. Vendrov A.M. CASE-technology. Modern methods and tools for designing information systems. – Moscow: Finansy i statistika, 1998. 176 pp. (In Russian).
13. Sokolov E.V., Kostyrin E.V. Functional model of the medical diagnostic services management system // Mechanical engineering and computer technologies, 2009. No. 3. URL: https://engineering-science.ru/doc/121943.html (accessed June 05, 2020) (In Russian).
14. GOST 22782.0-81 explosion-proof electrical Equipment. General technical requirements and test methods (with Changes N 1, 2, 3). URL: https://npopris.ru/wp-content/uploads/2015/04/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2-22782.0-81.pdf (accessed April 07, 2020).
15. GOST 22782.6-81 explosion-proof electrical Equipment with the type of explosion protection "Explosion-proof shell". Technical requirements and test methods. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/13834/ (accessed April 07, 2020).
16. GOST 24719-81 Electrical equipment for mining. Insulation, leakage paths and electrical gaps. Technical requirements and test methods. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/45673/ (accessed April 07, 2020).
17. TU 16-526. 553-84 asynchronous Motors of types VA02-280, VA02-315 and VA02-355. URL: http://www.laborant.ru/eltech/01/2/0/09-98.htm (accessed April 07, 2020).
18. GOST 32144-2013 Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards of quality of electric energy in General-purpose power supply systems. – Moscow: Standardinform, 2014 (In Russian).
19. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Algorithm and software implementation for searching the parameter values deviations from industrial equipment norms // Software & Systems, 2020. Vol. 33. No. 11. Pp. 91–95 (In Russian).
20. Gavrilova T.A., Khoroshevsky V.F. Knowledge base of intelligent systems. Saint Petersburg: Piter, 2000. 384 pp. (In Russian).
21. Kovalev S.M., Kolodenkova A.E. Creation of the knowledge base of the intelligent control system and preventions of risk situations at design complex technical systems // Ontology of designing, 2017. No. 4. Pp. 398–409 (In Russian).
22. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Fuzzy models and networks. – Moscow: Telecom, 2007. 284 pp. (In Russian).
23. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Development of a system of hierarchical production rules for diagnosing electrical equipment // Ontology of designing, 2020. Vol. 10. No. 1. – Pp. 63–72 (In Russian).
24. Kolodenkova A.E. The process modeling of project feasibility for information management systems using the fuzzy cognitive models // Herald of computer and information technologies, 2016. No. 6. Pp. 10–17 (In Russian).
25. Ginis L.A., Gorelova G.V., Kolodenkova A.E. Cognitive and simulation modeling of Socioeconomic systems // Proceedings of the International Research Conference Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2017), 2017. Vol. 72. Pp. 50–54.
26. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings, 2020. Pp. 1–5.
27. Catalog of electrical products. Rosenergomash. – URL: http://www.ventilator.kiev.ua/rozenberg/catalog.pdf (accessed: 05.06.2020) (In Russian).
28. Qaid W.A.A. Methods construction membership function of fuzzy sets // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki, 2013. No. 2 (139). Pp. 144–153 (In Russian).

doi: 10.14498/tech.2020.3.2

УДК 004.056

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ МЕЖДУ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

М.С. Гнутов, А.Б. Сизоненко

Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко
Россия, 350063, г. Краснодар, ул. Красина, 4

Аннотация. *Проанализировано влияние программных средств защиты на различные информационные системы. С помощью теории множеств описано задействование вычислительных ресурсов для совместного решения задач прямого назначения и задач защиты информации в автоматизированной системе. Предложена гибридная реализация вычислений в системе CPU+GPU. Рассмотрена актуальность использования метода ветвей и границ для составления минимального расписания задач защиты информации в гибридной многопроцессорной системе. Обозначены особенности обработки структур данных различными видами вычислителей. Проанализированы вычислительные стратегии метода ветвей и границ с наибольшей возможностью ускорения при ограниченных ресурсах. Выбран критерий эффективности, рассмотрены показатели эффективности при применении фронтальной и односторонней стратегии ветвления в зависимости от сложности вычислений и объема занимаемой памяти. Определен обобщенный показатель эффективности. Подчеркивается перспективность применения рассмотренного метода в распределенных системах посредством распределенного программирования.*

Ключевые слова: *метод ветвей и границ, графический процессор, центральный процессор, расписание для многопроцессорной системы, жадный алгоритм, распределенное программирование.*

Введение

В составе современных автоматизированных систем используются сложные средства вычислительной техники, обеспечивающие обработку задач и выработку решений в разнообразных сферах жизнедеятельности человека. Для графических вычислений в данных системах традиционно используются графические процессоры (GPU), для остальных расчетов применяются более многофункциональные, но менее многоядерные центральные процессоры (CPU).

Графические процессоры – это высокопроизводительные многоядерные процессоры. Возможность использования потенциала графического процессора в неграфических задачах привела к росту интереса пользователей и технических специалистов к графическим GPGPU и гибридным CPU+GPU вычислениям. Использование гибридных CPU+GPU систем для решения задач оптимизации систем защиты информации является перспективным направлением: при небольшом

Гнутов Максим Сергеевич, адъюнкт отдела научной работы и подготовки научно-педагогических кадров.

Сизоненко Александр Борисович (д.т.н., доцент), начальник кафедры «Защита информации от несанкционированного доступа».

энергопотреблении обеспечивается высокая производительность – радикально сокращается время, необходимое для вычислений и получения оптимальных решений. Сложность вычислений на GPU заключается как в обработке нерегулярных структур данных, которые не очень подходят для вычислений на графическом процессоре, так и в передаче информации между группами процессоров. Простая структура, скудный набор инструкций и отсутствие кэш-памяти графических ядер накладывают свои ограничения.

Как известно, существуют следующие основные программные методы обнаружения компьютерных вирусов:

– сканирование;
– обнаружение изменений;
– резидентные "сторожа";
– эвристический анализ;
– вакцинирование программных средств.

Такие действия, как, например, сканирование программных средств с использованием известных вирусных сигнатур (или их контрольных сумм), достаточно цикличны и позволяют с высокой эффективностью реализовать частичную обработку таких данных на графическом процессоре. Таким образом, использование распределенных вычислений на комбинированных CPU+GPU системах поможет перераспределить незадействованные системой ресурсы и в перспективе увеличить общее быстродействие автоматизированной системы. Задача центрального процессора будет состоять в обработке непараллельных вычислений, требующих более сложных наборов инструкций и организации обмена данных и вычисленных решений между множеством ядер графического ускорителя. Однако организация обмена данных также может создать очередь и нивелировать все преимущества комбинированных вычислений, поэтому использование CPU+GPU систем в той или иной степени сводится к задаче составления расписания для многопроцессорных систем. В статье [1] автор на примере описывает преимущества метода ветвей и границ над полным перебором множества всех имеющихся вариантов решения задачи коммивояжера. Начиная с восьми городов в маршруте преимущества метода ветвей и границ становятся явными. В современных же моделях видеоадаптеров количество процессоров измеряется не десятками, а тысячами – GeForce RTX 2080 Ti Gaming Z Trio, например, имеет 4352 универсальных процессора [2]. Поэтому составление расписания в многопроцессорных системах будем рассматривать на основе метода ветвей и границ.

1. Совместное использование ресурсов автоматизированной системы. Преимущества CPU+GPU систем

По результатам сравнительного исследования 18 продуктов безопасности (антивирус Касперского, Avast, AVG, McAfee, Norton Security, Total Security, Windows Defender и др.), проведенного в декабре 2019 года немецкой независимой лабораторией, специализирующейся на проверке и тестировании ведущих образцов антивирусного и защитного программного обеспечения, было выяснено: все средства защиты информации (в том числе предустановленный в Windows 10 защитник Windows Defender) в базовых настройках в среднем замедляют загрузку сайтов на 12–21 %, загрузку (запуск) приложений – на 13–30 %, установку стандартных приложений – на 18–51 %, а копирование и перенос файлов – на 5–25 % (см. таблицу). Для примера, защитник Windows Defender может замедлять установку приложений до 51 % [3]. Тестирование производилось на двух видах систем:

Среднепроизводительная система (standart) – на базе Intel i3-6100, 8 ГБ оперативной памяти, SSD-накопителем на 256 ГБ на операционной системе Windows 10 Professional 64bit;

Высокопроизводительная система (high-end) – на базе Intel i7-7770, 16 ГБ оперативной памяти, SSD-накопителем на 256 ГБ на операционной системе Windows 10 Professional 64bit.

Влияние средств защиты информации с базовыми настройками на скорость работы информационной системы, %

Вид замедления	Усредненные данные 18 продуктов безопасности		Антивирус Касперского	
	standart	high-end	standart	high-end
Замедление загрузки веб-сайтов	17–21	12–17	18–23	16–21
Замедление загрузки файлов	1–6	1–5	0–1	0–1
Замедление загрузки (запуска) стандартных приложений	15–30	13–14	10	7–8
Замедление установки популярных приложений	18–34	12–51	11–30	12–29
Замедление копирования файлов (локально и в сети)	5–13	5–25	1–2	1–3

В стандартах и инструкциях, разрабатываемых в интересах защиты информации в практически любых крупных организациях, имеется в том числе и ряд дополнительных требований к настройкам средств защиты информации. В результате программные средства защиты информации могут реализовывать усложненные методы проверки и анализа, что еще более негативно влияет на быстродействие конечной автоматизированной системы [4].

Для формализации описания вариантов задействования ресурсов автоматизированной системы введем следующие обозначения:

PU (Protection Unit) – подмножество необходимых ресурсов, которое необходимо задать для выполнения функции защиты информации автоматизированной системы за интервал времени Δt.

BU (Base Unit) – подмножество необходимых ресурсов, которое необходимо задать для решения задач в интересах автоматизированной системы за интервал времени Δt.

M (Memory) – ресурс памяти (совокупность физической и операционной памяти автоматизированной системы).

CPU (Central Processor Unit) – вычислительный ресурс центрального процессора.

GPU (Graphics Processing Unit) – вычислительный ресурс графического процессора.

На рис. 1 мы видим, что пересечение множеств $PU \cap BU$ при повышении нагрузки на систему в интервал времени Δt происходит на ресурсах CPU и M.

Следовательно, одновременное вычисление задач в интересах защиты информации и задач автоматизированной системы за время Δt при классическом подходе невозможно.

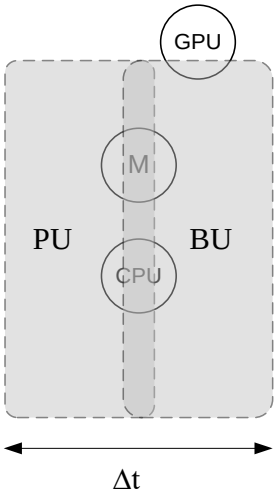


Рис. 1. Совместное использование ресурсов автоматизированной системы в промежуток времени Δt при классическом подходе

Перейдем к формализованному описанию. Подмножество $PU \subset (CPU \cup M)$ и $BU \subset (CPU \cup GPU \cup M)$. Для сохранения оперативности автоматизированных систем и сохранения должного уровня информационной безопасности необходимо, чтобы $PU \cap BU = 0$. Отсутствия пересечений данных множеств можно добиться двумя способами – путем увеличения времени Δt (что недопустимо по условию оперативности) или путем приращения неиспользуемых вычислительных ресурсов системы. За счет распараллеливания логико-математических задач защиты информации и подключения GPU возможно снятие части вычислительной нагрузки с CPU (рис. 2). Тогда $PU \subset (CPU \cup GPU \cup M)$.

Уменьшение использования ресурса M в интересах защиты информации также может происходить за счет приращения вычислительных возможностей путем подключения различных видов процессорных вычислителей. Например, при дефиците вычислительных мощностей и имеющейся свободной памяти повысить производительность логических вычислений можно представив логическую функцию таблицей и разместив ее в памяти.

Из проведенного анализа мы видим, что проблема влияния средств защиты информации на производительность автоматизированных систем является достаточно серьезной и требует системного решения. Увеличение вычислительных мощностей автоматизированной системы традиционно решалась наращиванием аппаратных ресурсов, однако это приводит к удорожанию системы и не всегда возможно на практике. Одним из способов решения указанной проблемы является разработка методик эффективного использования незадействованных ресурсов автоматизированных систем для решения задач защиты информации программными средствами. Рассмотрим их ниже.

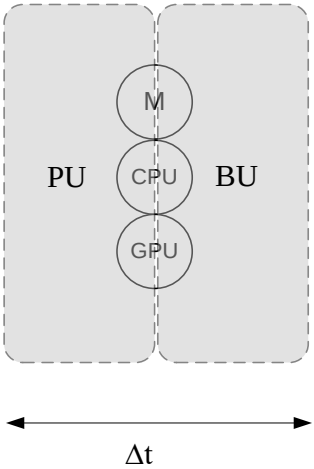


Рис. 2. Совместное использование ресурсов автоматизированной системы в промежуток времени Δt при использовании ресурсов GPU в интересах ЗИ

2. Составление оптимального расписания для гибридной многопроцессорной системы

Необходимо составить оптимальное по быстродействию расписание, т. е. назначить действия условного процесса системы защиты информации на процессоры таким образом, чтобы длина расписания была минимальной.

Формализуем данную проблему. Разобьем условный процесс системы защиты информации на множество задач $P\{p_1, p_2 ... p_n\}$. Т. к. рассматриваются параллельные вычисления, определим, что на конечный итог работы системы защиты информации не влияет последовательность выполнения задач на процессорах. Количество рассматриваемых процессоров примем равное m. m является собственным подмножеством множества процессоров CPU и множества процессоров GPU, т. е. $m \subset (CU \cup GU)$ и $m \neq (CU \cup GU)$. Длительность выполнения задачи p_i на процессоре j обозначим $t_{p_i j}$, где $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,m}$. L_j –длина задач на процессоре j.

Таким образом, длина расписания выражается как $\max L_j$.

Минимальную длину расписания тогда можно представить следующим образом:

$$\min \max L_j ,$$

т. е. ищется такое распределение задач, при котором наибольшая величина L_j принимает минимальное значение.

Метод ветвей и границ подразумевает решение подобных задач как разбиение множества всех допустимых решений на подмножества, для которых определяются верхние и нижние границы минимального времени выполнения задач. Если при сравнении двух подмножеств нижняя граница F_l первого подмножества оказывается больше, чем верхняя граница F_h второго подмножества, то первое подмножество в дальнейших расчетах игнорируется, т. к. оптимальная длина расписания там отсутствует.

Данные расчеты производятся для отдельно взятого процесса на гибридном CPU+GPU вычислителе. Следовательно, определенная часть задач этого процес-

са может быть уже назначена на конкретные процессоры существующими инструкциями. Обозначим часть назначенных задач – k. Вершина k может находиться в произвольном месте дерева решений между корнем (уровнем 0) и листьями (конечным уровнем p_n). Для k задач, соответственно, известно L_j. Тогда

$$F_l = (\sum_{j=1}^{m} L_j + \sum_{p_i=k+1}^{p_n} \min_{j=\overline{1,m}} t_{p_i j}).$$

Т. е. за нижнюю оценку можно принять совокупность сумм длительностей назначенных задач и сумм длительностей оставшихся задач, выполненных на самом быстром для них процессоре.

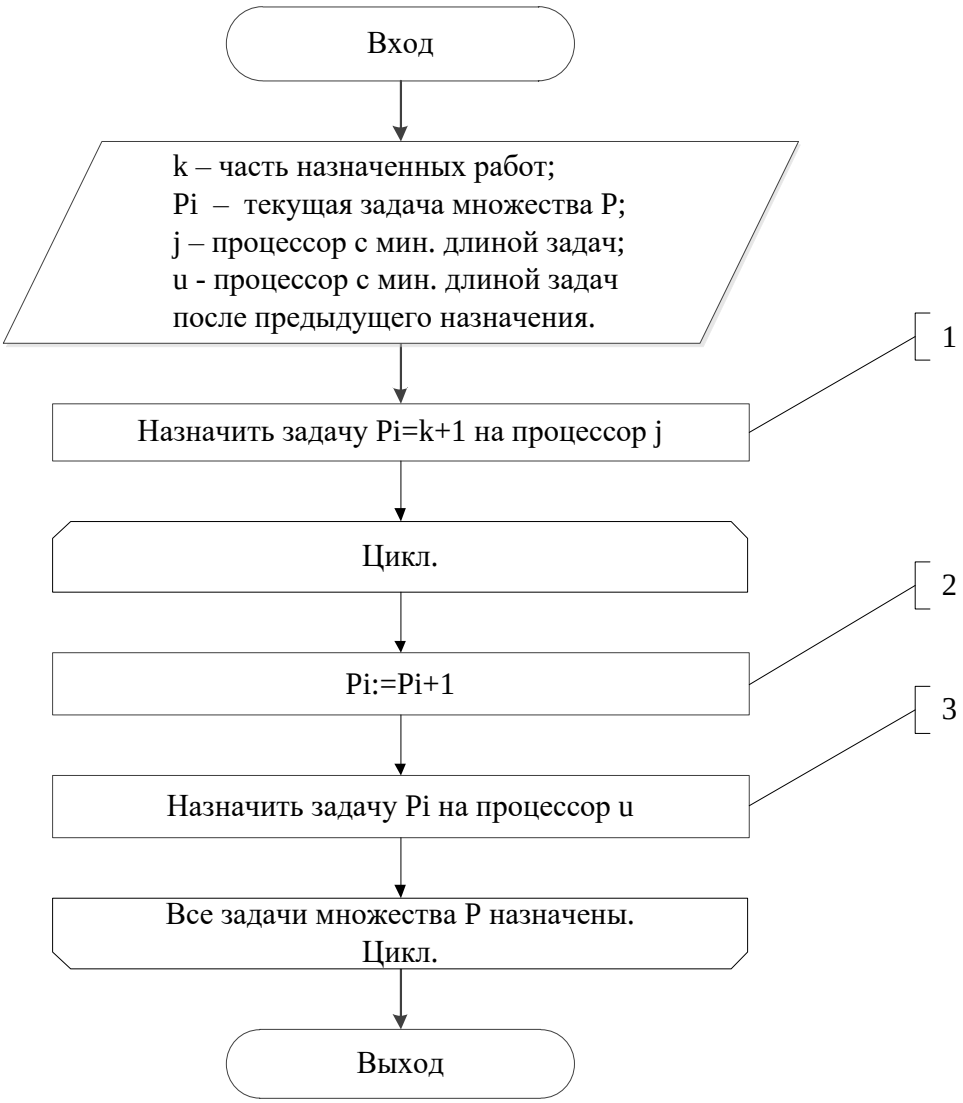


Рис. 3. Блок-схема работы жадного алгоритма

Для поиска F_h можно применить жадный алгоритм (рис. 3). Заполнение задачами процессоров по этому алгоритму будет выглядеть следующим образом:

1. Назначить первую из задач $p_i = \overline{k+1, p_n}$ на процессор j с минимальной длиной задач $min\, L_j$.

2. Перейти к следующей задаче $p_i := p_i + 1$. Если все задачи назначены, то далее следует выход из алгоритма.

3. Назначить задачу p_i на процессор u (с минимальной длиной задач после предыдущего назначения Q), $u = \overline{1, m}$, $Q_j = \max\left(L_1, \ldots, L_{j-1}, L_j + t_{p_i j}, L_{j+1}, \ldots\right)$, $\min\limits_{j=\overline{1,m}} Q_j = Q_u$, возврат в п. 2.

Когда все задачи назначены, находим максимальную длину расписания и принимаем ее как верхнюю оценку F_h для выбранной вершины уровня *k*:

$$F_h = \max_{j=\overline{1,m}} L_j .$$

Оптимальное расписание F_o находится в диапазоне $F_l \le F_o \le F_h$.

3. Выбор стратегии ветвления метода ветвей и границ. Критерий эффективности, показатели эффективности

Существуют две основных стратегии построения дерева в методе ветвей и границ – одностороннее ветвление и фронтальное ветвление.

При выборе стратегии одностороннего ветвления на каждом уровне выбирается вершина с минимальной нижней оценкой, остальные вершины этого уровня игнорируются. Ветвление происходит только из вершины вышестоящего уровня с $\min F_l$ (рис. 4).

При выборе стратегии фронтального ветвления дерево решений строится полностью, т. е. на каждом уровне определяются все вершины (рис. 5). Отсев выполняется после вычисления верхних и нижних оценок и сравнения подмножеств (см. выше).

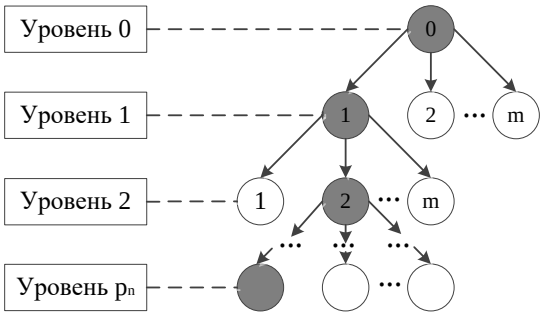


Рис. 4. Стратегия одностороннего ветвления

Как известно, более компактной форме представления, содержащей меньшее количество логических операций, будет соответствовать более производительная программная и менее громоздкая аппаратная реализация [5]. Соответственно, при выборе стратегии одностороннего ветвления времени для вычислений необходимо больше, памяти – меньше, при выборе фронтальной стратегии ветвления, наоборот, времени для вычислений необходимо меньше, памяти – больше.

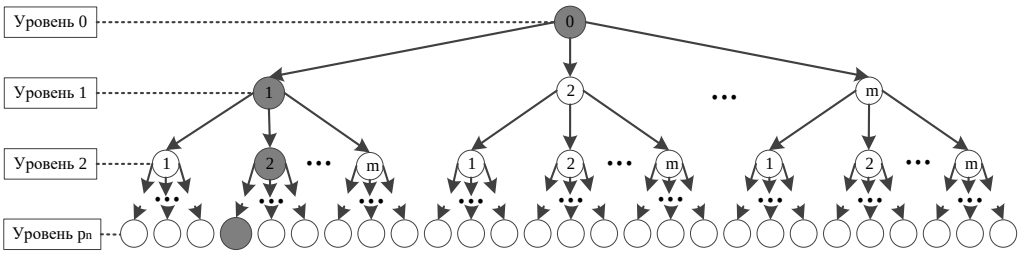


Рис. 5. Стратегия фронтального ветвления

Для выбора стратегии в конкретной автоматизированной системе необходимо произвести анализ физических и вычислительных возможностей системы, а также ряда требований к быстродействию и защите информации. В любом случае основным показателем эффективности работы рассматриваемых систем будет время t.

Критерием эффективности может быть минимальное время вычисления составления расписания: $\min t$ при имеющихся ограничениях на ресурсы системы $r \to lim$. Ресурсами системы являются объем оперативной и физической памяти, тактовые частоты процессоров, количество логических элементов и т. д.

Показателем объемной эффективности будет являться отношение количества бит, используемых для хранения всех возможных вершин дерева решений $N_{фв}^{кб}$, к количеству бит, используемых для хранения вершин при одностороннем ветвлении $N_{ов}^{кб}$:

$$v = \frac{N_{фв}^{кб}}{N_{ов}^{кб}}.$$

Показателем эффективности по сложности вычислений примем отношение количества выполняемых действий (тактов вычислителя), необходимых для вычисления оптимального расписания при фронтальном ветвлении $N_{фв}^{m}$, к количеству выполняемых действий (тактов вычислителя), необходимых для вычисления оптимального расписания при одностороннем ветвлении $N_{ов}^{m}$:

$$d = \frac{N_{фв}^{m}}{N_{ов}^{m}}.$$

Обобщенным показателем эффективности тогда будет:

$$c = v \cdot d.$$

Критерием эффективности будет $\max c$ при всех возможных вариантах расчета расписания.

4. Распределенное программирование в распределенных автоматизированных системах

Помимо параллельных вычислений существует и другой метод, позволяющий повысить эффективность использования имеющихся ресурсов. Он основан на кардинально ином подходе к самому программированию – так называемом распределенном программировании [6]. Он позволяет, в том числе, реализовать использование удаленных ресурсов иной вычислительной системы сети в интересах пользователя. Распределенное программирование в той или иной степени

включает в себя сетевое программирование и подразумевает общение посредством сетевого соединения между программами клиента и сервера [7]. Т. е. существует возможность использовать для параллельных вычислений, выполняемых на машине пользователя, вычислительные возможности, например, графического ускорителя соседней машины или сервера в распределенной автоматизированной системе.

Выводы

В современных реалиях, предписывающих распределенным автоматизированным системам максимальное быстродействие и минимальное время отклика посылаемого сигнала, остро встает проблема эффективности программной подсистемы защиты информации. Чем выше требования к настройке политики безопасности, тем сильнее средство защиты информации влияет на общее быстродействие. Перенаправление циклических вычислений системы защиты информации на пригодные к таким расчетам ядра графического процессора позволит существенно снизить нагрузку на информационную систему в целом. В зависимости от мощности имеющихся вычислительных ресурсов и объема памяти можно рассчитать оптимальную стратегию применения метода ветвей и границ.

Дополнительное преимущество, получаемое за счет перераспределения вычислений конкретной ЭВМ на ресурсы всей распределенной автоматизированной системы, дает распределенное программирование.

Грамотно скомбинированное использование рассмотренных в статье методов и алгоритмов открывает перед разработчиками огромные возможности для написания и реализации программ, позволяющих многократно увеличить вычислительные возможности распределенных автоматизированных систем путем перераспределения имеющихся ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решение задачи коммивояжера алгоритмом Литтла с визуализацией на плоскости. [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/post/332208 (дата обращения 28.05.2020).
2. Видеокарта MSI GeForce RTX 2080 Ti Gaming Z Trio получила более быструю память GDDR6 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hardwareluxx.ru/index.php/news/hardware/grafikkarten/49422-videokarta-msi-geforce–rtx-2080-ti-gaming-z-trio-poluchila-bolee-bystruyu-pamyat-gddr6.html (Дата обращения 03.06.2020).
3. Antivirus & Securuty software Test [Электронный ресурс]. – URL: http://spkurdyumov.ru/economy/informacionnye-texnologii-sostoyanie-i-perspektivy (Дата обращения 10.02.2020).
4. Сравнение сертифицированных средств защиты информации от несанкционированного доступа для серверов и рабочих станций (СЗИ от НСД) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.anti-malware.ru/compare/information-protection-unauthorized-access-fstek-certified#part1 (Дата обращения 05.02.2020).
5. *Сизоненко А.Б.* Логико-математическое моделирование и синтез алгоритмов функционирования средств и систем защиты информации: монография. – Краснодар: КрУ МВД России, 2013. – 146 с.
6. *Камерон Х., Трейси Х.* Параллельное и распределенное программирование на С++. – М.: Вильямс, 2004. – 672 с.
7. Достоинства и недостатки параллельного программирования [Электронный ресурс]. – URL: http://web.snauka.ru/issues/2016/06/69538 (Дата обращения 06.06.2020).
8. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010; введ. 01.12.2011. – М.: Стандартинформ, 2011. – 47 с.
9. *Kumar Jain A., Singh Y., Updhyay S.* Information systems security: A review. Ind Jour Math & Comp Sc. Jhs., 2013, № 2. P. 26–30.

10. *Боресков А.В., Садовничий В.А.* Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: учеб. пособие. – М.: Изд-во Московского университета, 2012. – 336 с.
11. Nvidia's Next Generation CUDA Compute Architecture: Kepler TM GK110 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.nvidia.ru/content/PDF/kepler/NVIDIA-Kepler-GK110-Architecture-Whitepaper.pdf
12. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации, утв. Указом Президента Российской Федерации № 646 от 05.12.2016 // СПС «Консультант Плюс» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru
13. *Сизоненко А.Б.* Модели и алгоритмы синтеза логиковычислительных подсистем защиты информации систем критического применения. – Воронеж, 2016. – 32 с.
14. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1 – Введение и общая модель. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012; введ. 01.12.2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 75 с.
15. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2 – Функциональные компоненты безопасности. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013; введ. 01.09.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 242 с.
16. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3 – Компоненты доверия к безопасности. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3-2013; введ. 01.09.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 214 с.

Статья поступила в редакцию 25 июня 2020 г.

METHODOLOGY FOR DISTRIBUTING INFORMATION PROTECTION TASKS BETWEEN COMPUTER DEVICES OF AUTOMATED SYSTEMS BASED ON THE BRANCH AND BORDER METHOD

M. Gnutov, A. Sizonenko

Krasnodar higher military school
4, Krasina str. Krasnodar, 350063, Russian Federation

Abstract. *The influence of software protection on various information systems is analyzed. Using set theory, the use of computational resources for the joint solution of direct tasks and information protection tasks in an automated system is described. A hybrid implementation of computing in a CPU + GPU system is proposed. The relevance of using the branch and bound method to compile a minimum schedule of information security tasks in a hybrid multiprocessor system is considered. The features of processing data structures by various types of calculators are indicated. The computational strategies of the branch and bound method with the greatest possibility of acceleration with limited resources are analyzed. The efficiency criterion is selected, the performance indicators are considered when applying the frontal and one-sided branching strategies depending on the complexity of the calculations and the amount of occupied memory. The generalized indicator of efficiency is defined. The prospects of applying the considered method in distributed systems through distributed programming are emphasized.*

Keywords: *branch and bound method, GPU, CPU, schedule for a multiprocessor system, greedy, distributed programming*

REFERENCES

1. Resheniye zadachi kommivoyazhera algoritmom Littla s vizualizatsiyey na ploskosti [Solving the traveling salesman problem using the Little algorithm with visualization on the plane]. https://habr.com/en/post/332208 (accessed May 28, 2020).

Maxim S. Gnutov, Adjunct.
Alexander B. Sizonenko (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

2. Videokarta MSI GeForce RTX 2080 Ti Gaming Z Trio poluchila boleye bystruyu pamyat' GDDR6 [The MSI GeForce RTX 2080 Ti Gaming Z Trio graphics card received faster GDDR6 memory]. https://www.hardwareluxx.ru/index.php/news/hardware/grafikkarten/49422 - videokarta - msi - geforce - rtx - 2080 - ti - gaming - z - trio - poluchila - bolee-bystruyu - pamyat - gddr6.html (accessed June 03, 2020).
3. Antivirus & Securuty software Test. http://spkurdyumov.ru/economy/informacionnye-texnologii-sostoyanie-i-perspektivy (accessed October 02, 2020).
4. Sravneniye sertifitsirovannykh sredstv zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa dlya serverov i rabochikh stantsiy (SZI ot NSD) [Comparison of certified means of protecting information from unauthorized access for servers and workstations (SZI from NSD)]. https://www.anti-malware.ru/compare/information-protection-unauthorized-access-fstek-certified#part1 (accessed February 05, 2020)
5. *Sizonenko A.B.* Logiko-matematicheskoye modelirovaniye i sintez algoritmov funktsionirovaniya sredstv i sistem zashchity informatsii: [Logical-mathematical modeling and synthesis of algorithms for the functioning of means and systems of information protection]. Krasnodar, Institute of the Ministry of the Interior of Russia, 2013.146 p. (In Russian).
6. *Cameron H., Tracy H.* Parallel'noye i raspredelennoye programmirovaniye na C++ [Parallel and distributed programming in C ++]. Williams, 2004. 672 p.
7. Dostoinstva i nedostatki parallel'nogo programmirovaniya [Advantages and disadvantages of parallel programming]. http://web.snauka.ru/issues/2016/06/69538 (accessed June 06, 2020).
8. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Menedzhment riska informatsionnoy bezopasnosti GOST R ISO/MEK 27005-2010 [Information technology. Security methods and tools. Information Security Risk Management GOST R ISO / IEC 27005-2010]. Standartinform, 2011. 47 p. (In Russian).
9. *Kumar Jain A., Singh Y., Updhyay S.* Information systems security: A review. *Ind Jour Math & Comp Sc. Jhs.*, 2013, no. 2. Pp. 26-30.
10. *Boreskov A.V., Sadovnichiy V.A.* Parallel'nyye vychisleniya na GPU. Arkhitektura i programmnaya model' CUDA : ucheb. Posobiye [GPU parallel computing. Architecture and software model CUDA] Publishing house of Moscow University, 2012. 336 p. (In Russian).
11. Nvidia's Next Generation CUDA Compute Architecture: KeplerTM GK110. http://www.nvidia.ru/content/PDF/kepler/NVIDIA-Kepler-GK110-Architecture-Whitepaper.pdf (accessed June 06, 2020).
12. Doktrina informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii, utv. Ukazom Prezidenta Rossiyskoy Federatsii [The doctrine of information security of the Russian Federation, approved. Decree of the President of the Russian Federation No. 646 dated 12.05.2016] http://www.consultant.ru (accessed June 10, 2020).
13. *Sizonenko A.B.* Modeli i algoritmy sinteza logikovychislitel'nykh podsistem zashchity informatsii sistem kriticheskogo primeneniya [Models and algorithms for the synthesis of logic-computing subsystems of information protection of critical application systems]. Voronezh, 2016. 32 p. (In Russian).
14. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Menedzhment riska informatsionnoy bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. Chast' 1 - Vvedeniye i obshchaya model' [Information technology. Security methods and tools. Information Security Risk Management. Criteria for assessing the security of information technology. Part 1 - Introduction and general model. GOST R ISO / IEC 15408-1-2012] Standartinform, 2013. 75 p. (In Russian).
15. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. Chast' 2 – Funktsional'nyye komponenty bezopasnosti [Information technology. Security methods and tools. Criteria for assessing the security of information technology. Part 2 – Functional safety components. GOST R ISO / IEC 15408-2-2013] Standartinform, 2014. 224 p. (In Russian).
16. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. Chast' 3 – Komponenty doveriya k bezopasnosti [Information technology. Security methods and tools. Criteria for assessing the security of information technology. Part 3 – Security Trust Components. GOST R ISO / IEC 15408-3-2013] Standartinform, 2014. 214 p. (In Russian).

doi: 10.14498/tech.2020.3.3

УДК 681.5.017

КОГНИТИВНАЯ АГРЕГАТИВНО-ПОТОКОВАЯ МЕТАМОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.С. Ковтун

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, 4А

E-mail: Vladimir.S.Kovtun@rsce.ru

Аннотация. *В настоящее время существует актуальная научная проблема обеспечения эффективного выполнения программы полета автоматического космического аппарата (АКА) с учетом материальных, энергетических и информационных ресурсных ограничений бортовых систем (БС). Расход ресурсов БС в значительной степени зависит от синергетических явлений, возникающих при межсистемном взаимодействии в АКА. За счет использования этих явлений можно увеличить эффективность применения имеющихся ресурсов, а также дополнить их новыми «синергетическими» ресурсами [1, 2]. Одновременно синергетические явления могут приводить к преждевременной выработке ресурса БС и непредвиденным (нерасчетным) отказам и авариям [3]. Для целенаправленного поиска и использования данных синергетических явлений требуется проводить специальное исследование происходящих на борту процессов. Исследование становится возможным только при переходе от системно-кибернетической модели АКА как «черного ящика» к системно-кибернетической модели, обеспечивающей «прозрачность» АКА как «белого ящика», для чего требуется высокая точность и сложность анализа протекающих на борту процессов [4]. Данная ситуация обуславливает актуальность разработки новых инженерных методик и технологий моделирования. Для их создания необходимо решить проблему начального этапа построения моделей, описывающих в той или иной форме инженерные знания экспертов – разработчиков БС и специалистов по управлению полетом [5]. Разработка универсального метода для решения проблемы начального этапа моделирования значительно усложняется из-за большого разнообразия БС, каждая из которых обладает своими эмерджентными и синергетическими свойствами, в значительной степени зависящими от «неклонируемости» их элементов [6, 7].*

В статье для упрощения моделирования процессов функционирования реальных БС с учетом их специфики предлагается проводить предварительную разработку формализованной когнитивно структурированной агрегативно-потоковой метамодели («модели моделей») процесса управления полетом АКА, содержащей информацию о потенциально существующих возможностях управления состоянием аппаратов в различных условиях реализации номинальных и аномальных процессов. Создание концептуальной метамодели позволяет перейти от предметной формализованной модели к следующим этапам моделирования – формально-математическому и материально-функциональному моделированию, в ходе которых учитываются индивидуальные особенности протекания процессов на борту АКА при управлении его полетом. Одновременно решаются задачи преодоления сложности метамодели, включающей и ее размерность.

Ключевые слова*: автоматический космический аппарат, модель, когнитивная карта, синергетические явления, матрица инциденций, агрегат, функциональный граф.*

Ковтун Владимир Семенович (к.т.н.), главный специалист по системному проектированию.

Введение

Непременным условием устойчивого функционирования АКА на протяжении всего времени его активного существования на орбите является ресурсное обеспечение БС. На этапе эскизного проектирования аппарата для выполнения программы полета устанавливается ресурсный баланс (сводка) БС, в который входит необходимый запас встроенных в эти системы структурных и функциональных ресурсов, в том числе определяется необходимая масса рабочего тела (РТ) для электроракетных двигателей и топлива для жидкостных ракетных двигателей, мощность бортовых источников электроэнергии. Проектный расчет ресурсного обеспечения производится на основе комплексного анализа первичных причинно-следственных топологических и функциональных номинальных связей между БС и их элементами, а также эмерджентных свойств, выявленных в результате реализации на практике двойственных взаимосвязанных процессов декомпозиции-агрегирования (объединения, укрупнения) тех или иных бортовых подсистем в общую БС. Однако, как бы ни производилась декомпозиция АКА, на самом «первичном» уровне, который определяется «системой», из-за ее открытости и нелинейности возникают неявные эволюционные вторичные причинно-следственные взаимодействия, которые традиционные функциональная и топологическая схемы систем не отражают. Вторичные взаимодействия, вызванные многоместными отношениями номинальных процессов, протекающих в системах, с процессами, определяемыми внешними факторами, приводят к появлению синергетических явлений.

Далее будем называть синергетическими ресурсами такой вид ресурсов, который формируется в ходе самоорганизации и саморазвития БС за счет объективно существующих явных и неявных многоместных отношений, описывающих взаимодействия между процессами, протекающими в ходе совместного функционирования рассматриваемых систем с учетом влияния внешней среды.

АКА одновременно является сложной технической системой (СТС) и большой технической системой (БТС). С гносеологической позиции система является сложной, так как требует для познания привлечения многих моделей (многомодельности), многих теорий и научных дисциплин. Одним из наиболее существенных видов онтологической сложности системы является сложность моделирования [4]. А понятие БТС определяется размерностью моделей, приводящей к необходимости применения операций декомпозиции и агрегирования. В инженерии знаний для решения проблемы моделирования сложных и больших систем применяется метод, основанный на использовании прототипов моделей предметной области. Этот метод используется в качестве концептуальной основы нового научного направления – моделе-ориентированной системной инженерии (model-based systems engineering – MBSE) [8, 9]. В MBSE для решения этой проблемы предварительно разрабатываются «модели моделей» (метамодели). При этом метамодель интерпретируется как концептуальная модель, отражающая свойства и закономерности, одновременно принадлежащие всему множеству отдельных («простых») моделей, которые агрегируются в сложные модели.

Далее с использованием метамодели как основы производится построение моделей конкретных объектов одного класса, исследуемых с применением выбранного множества. Современные методологии моделирования сложных и больших систем, включая MBSE, разъясняют, что и почему надо делать для решения таких задач, но не объясняют, как их решать в конкретной космической предметной области. *Цель данной статьи – построить концептуальную метамодель для изучения эмерджентных свойств БС с учетом синергетических явлений, возникающих в процессе выполнения космического полета АКА.*

Декомпозиция и стратификация процесса управления полетом автоматического космического аппарата

Синергетические явления на борту АКА обнаруживают себя на уровне физических процессов. Поэтому необходима декомпозиция АКА как материального объекта, а также соответствующая декомпозиция процессов управления его полетом на каждом конкретном уровне детализации АКА.

Согласно предлагаемой декомпозиции (схеме деления) АКА выстраивается следующая иерархическая структура, состоящая из 4 уровней описания, где на верхнем уровне находится АКА как СТС, ниже располагаются соответственно системы, элементы систем и внутриэлементные материальные устройства [10]. Каждая материальная часть АКА в иерархической структуре рассматривается как объект управления, а сами сложные процессы, в нем протекающие, являются предметом исследования. Все перечисленные объекты и их части являются материальными, а при их объединении в целостную структуру образуются информационно-материально-энергетические поля, действующие на объекты и их подсистемы своими силами. Материальные объекты взаимодействуют посредством соответствующих полей в виде физических процессов – носителей действий.

Расход и регенерация ресурса – это изменение вещественной формы материального объекта, зависящее от взаимодействия физических полей и отображаемое свойствами, оцениваемыми параметрическими характеристиками процессов. Испытания, проводимые с материальными объектами АКА на протяжении всего их жизненного цикла, есть не что иное, как силовые взаимодействия информационно-энергетических полей. При этом синергетические явления в БС и их естественное ресурсное обеспечение зависят от данных взаимодействий.

Процесс, протекающий в БС, рассматривается как физическое явление, происходящее в материальном объекте и управляемое системой – регулятором процесса (системой управления космическим аппаратом, его бортовой аппаратурой, элементами конструкции и др.) и/или группой регуляторов, приводящее к изменению состояния процесса. При этом процесс называют простым, если для него можно разработать только одну концептуальную, материальную и/или математическую модель, описывающую изменение различных физических явлений исследуемого процесса через известное отображение области определения параметров процессов в область их значений. Сложный процесс рассматривается как совокупность простых процессов [5]. С помощью регулятора как управляющего устройства отслеживается, оценивается, прогнозируется состояние процесса, а для его изменения вырабатываются управляющие воздействия. Предлагается для моделирования АКА и процессов управления его полетом использовать стратифицированное описание (создание слоев – страт) на 4 уровнях: целевых процессов, происходящих на уровне АКА (базовых процессов (БП) – 1-й уровень); процессов, происходящих на системном (2-й уровень), элементном (3-й уровень) и внутриэлементном (4-й уровень) уровнях. Регуляторами этих процессов являются управляющие подсистемы: на страте первого уровня (С1) – АКА, взаимодействующим с внешней средой; второго (С2) – системами АКА; третьего (С3) – элементами систем и на страте четвертого уровня (С4) – внутриэлементными устройствами. Каждому процессу на борту АКА ставится в соответствие множество телеметрируемых параметров, значения которых измеряются датчиками, а также параметров-сообщений, формируемых алгоритмами бортовых вычислительных средств, выполняющих функцию автоматического управления и контроля работы БС [10, 11].

Для перехода от лингвистического описания равновесного рабочего состояния регуляторов, которое, как правило, присутствует в технической документации на систему и ее элементы, к их параметрическому описанию, зафиксированному на текущий момент времени, вводится допущение о возможности статического описания процессов. Такое допущение позволяет первоначально не учитывать временной фактор, предполагая, что он не оказывает влияния на результаты декомпозиции и стратификации процесса управления полетом АКА в каждый текущий момент времени.

В результате для описания в каждый момент времени явлений, происходящих во всех регуляторах, на каждой страте вводятся следующие множества $\mu(\ )$ параметров, каждому из которых ставятся в соответствие процессы (Π), для которых введены следующие обозначения [5]:

– 1-я страта, базовые процессы:

$$\mu(\Pi_j) = \{\Pi_j / \ j = 1, 2, \ldots, J\}, \tag{1}$$

где j – обозначение текущего номера базового процесса;

– 2-я страта, системные процессы:

$$\mu(\Pi_j^{sk}) = \{\Pi_j^{sk} / \ j = 1, 2, \ldots, J;\ s = 1, 2, \ldots, S;\ k_s = 1, 2, \ldots, K\}, \tag{2}$$

где s – обозначения текущего номера системного процесса и k_s-го текущего номера варианта его реализации за счет структурных и функциональных резервов;

– 3-я страта, процессы в элементах систем:

$$\mu(\Pi_{jp}^{sk}) = \{\Pi_{jp}^{sk} / \ j = 1, 2, \ldots, J;\ s = 1, 2, \ldots, S;\ k_s = 1, 2, \ldots, K;\ p = 1, 2, \ldots, P\}, \tag{3}$$

где p – обозначение текущего номера процесса в системном элементе;

– 4-я страта, процессы внутриэлементных устройств:

$$\begin{aligned}\mu(\Pi_{jp(z)}^{sk}) = \{&\Pi_{jp(z)}^{sk} / \ j = 1, 2, \ldots, J;\ s = 1, 2, \ldots, S;\\ &k_s = 1, 2, \ldots, K;\ p = 1, 2, \ldots, P;\ z = 1, 2, \ldots, Z\},\end{aligned} \tag{4}$$

где z – обозначение текущего номера процесса в устройстве.

Процессы, которым поставлены в соответствие множества (1)–(3), рассматриваются одновременно и как простые, и как сложные. В дальнейшем в статье используется инвестиционный принцип перехода от процессов более низкого уровня к процессам более высокого уровня. В принятой иерархии процессы четвертого уровня (4) – простейшие, т. е. условно они не включают в себя процессы еще более низкого уровня. При необходимости вводятся дополнительные уровни страт с условием, что процесс самого нижнего уровня определяет свойства объекта управления как «белого ящика» [4]. Согласно введенному дуализму, простые процессы страт первого – третьего уровней одновременно являются сложными, содержащими в себе процессы более низкого уровня, что позволяет последовательно детализировать процессы в объекте управления. Детализация происходит за счет «прозрачности» описания параметрических характеристик нижестоящих процессов, входящих в состав вышестоящих и определяющих их.

Статическая когнитивная модель сложного процесса управления полетом автоматического космического аппарата

При выполнении полетных операций существует множество вариантов (вариабельность) возникновения синергетических явлений на борту аппарата, каждый из которых является причиной появления новых эмерджентных свойств БС и АКА в целом, от которых зависит расход ресурсов и обеспечение живучести. Возникновению новых целостных свойств БС способствуют не только временные, но и синергетические системные факторы, которые необходимо распознавать и учитывать при выборе варианта управлении полетом АКА для дальнейшего прогнозирования или создания сценария развития состояния аппарата. Поэтому можно говорить о высоком уровне нестабильности и нестационарности воздействий внешней среды на процессы управления полетом АКА и высокой степени сложности принятия управленческих решений. При высоком уровне нестабильности среды целесообразно использовать управление на основе гибких экспертных решений, базирующихся на когнитивном подходе, который, в свою очередь, основывается не столько на интуиции эксперта, сколько на упорядоченном и верифицированном применении его знаний об АКА как СТС.

Основу когнитивного подхода составляет когнитивный системный анализ процессов (как инструмент исследования), позволяющий выявить противоречия и провести качественную и количественную оценку изучаемых процессов. В начале когнитивного анализа целесообразно проводить (как показали исследования) построение статической когнитивной модели на основе предварительной структуризации процесса управления полетом АКА в виде когнитивной карты (рис. 1).

Иерархическая когнитивная карта построена в виде множеств ориентированных функциональных графов (объединенных пунктирной линией), распределенных по уровням страт (см. рис. 1), в каждом из которых установлены материальные, энергетические и информационные связи между процессами в регуляторах. Кроме них, существуют связи-факторы, оказывающие внешнее синергетическое влияние на основные процессы. Построенная иерархическая когнитивная карта является статической моделью сложного процесса управления полетом АКА [12]. Для описания функциональных графов существует несколько классов матриц, из которых были выбраны основные – матрицы смежности и инциденций [13]. Каждому множеству процессов Π на стратах соответствует множество вершин функционального графа, веса которых определяются соответствующими элементами множества коэффициентов (множеством констант), пропорциональных располагаемым полетным временам.

Каждой m-й дуге графа соотносится вес, который задается исходя из физической интерпретации бинарных отношений $r_1, r_2, \ldots, r_n$, построенных на декартовом произведении множеств управляющих (УВ) $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)$ и возмущающих воздействий (ВВ) $\vartheta = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6)$, формирующих множество входных воздействий $V = U \times \vartheta$ [12], где ξ_6 – ВВ от взаимодействия, вызванного синергетическим явлением.

При этом на дугах функционального графа между элементами множеств УВ и ВВ существуют многоместные n-арные отношения, определяющие одновременное приложение нескольких УВ и ВВ:

$$U\left(U_1, U_2, \ldots, U_n\right),\ U_1 = \left(u_1, u_3, u_4\right),\ U_2 = \left(u_1, u_2, u_4\right), \ldots, U_n = \left(u_1, \ldots, u_4, n = \overline{1,4}\right),$$

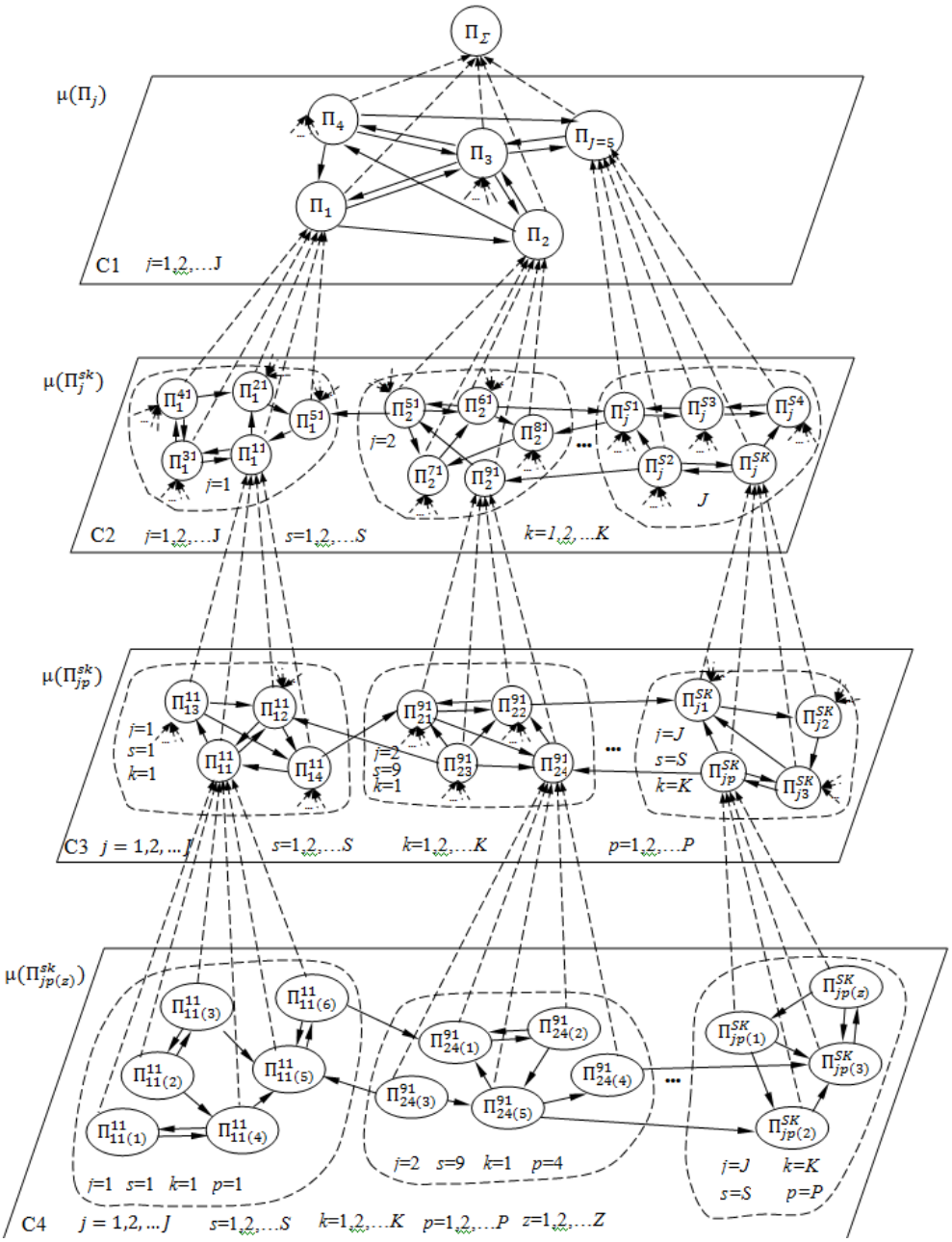


Рис. 1. Когнитивная карта процесса управления полетом АКА

$$\Xi\left(\Xi_1,\Xi_2,...,\Xi_n\right),\ \Xi_1=\left(\xi_1,\xi_2,\xi_3,\xi_5\right),\ \Xi_2=\left(\xi_1,\xi_2,\xi_4,\xi_6\right),...,\ \Xi_n=\left(\xi_1,...,\xi_n,n=\overline{1,6}\right).$$

Далее производится бинаризация n-арных отношений [14]: $< U_1\ r_1\ \vartheta_1 >_1$, $< U_2\ r_2\ \vartheta_2 >_2, ...,\ < U_n\ r_n\ \vartheta_n >_m$ с установлением тем самым графика бинарных отношений на дугах функционального графа $R_{nm}= \{r_1, r_2, ..., r_n\}_m \subseteq V$.

Матрицы смежности и инцидентности функциональных графов позволяют конструктивно задать функции сложного процесса управления полетом АКА с помощью соответствующих графов.

При этом матрицы смежности описывают связь между входными и выходными физическими переменными процессов типа $y = f(x_1, ..., x_n)$, представляющую собой функциональную модель (Ф-модель) «черного ящика». А матрицы инцидентности позволяют описать способ действия, характеризующийся физическими преобразованиями материальных, энергетических и информационных входов внутри объекта управления, для формирования выходных переменных параметров процессов. При этом обеспечивается конструктивное описание реальной функции f, осуществляющей отображение f: $X \rightarrow Y$. Тем самым формируется Ф-модель «белого ящика» [4].

Предложенный инвестиционный принцип перехода от процессов управления АКА более низкого уровня к процессам управления более высокого уровня повлек за собой использование вложенных функциональных графов. В результате сформирован способ конфигурирования графа сложного процесса управления полетом АКА, заключающийся в четырехслойном планарном его построении (С1-С4), соответствующим декомпозиции сложного процесса управления полетом АКА. При этом граф называется планарным, если изображается на плоскости так, что его ребра пересекаются только в вершинах [13].

Алгоритм построения когнитивной агрегативно-потоковой метамодели процесса управления полетом автоматического космического аппарата

Предлагается производить моделирование сложного процесса управления полетом АКА с помощью «динамической когнитивной карты», в которой бинарные отношения УВ и ВВ зависят от времени и параметрических характеристик процессов, которым поставлены в соответствие вершины рассматриваемых функциональных графов. При этом выбирается структурно-функциональный базис для моделирования процессов на каждой страте – базис СФ-моделей [4]. Описание каждого функционального графа «динамической когнитивной карты» производится с использованием матриц инциденций на интервалах, ограниченных дискретными моментами времени $t_0, t_1, t_2, \ldots, t_i$, формирующими множество моментов времени T. При этом учитываются веса ребер, связанных как с входными воздействиями, так и с процессами формирования выходных воздействий в каждом объекте управления для смежных объектов.

Закономерность смены состояния АКА предлагается описывать переходным отображением (φ) и выходным отображением (ψ):

$$\varphi:\ \hat{\Pi} \times R \times T \rightarrow \hat{\Pi}\ ,\ \psi:\ \hat{\Pi} \times R \times T \rightarrow \tilde{\Pi}\ .$$

При отображении процесса применяется частный случай динамической системы – конечный автомат. При этом каждому моменту времени t_i сопоставляются свои множества определений $(\hat{\Pi} \subset \Pi)_i$ и значений $(\tilde{\Pi} \subset \Pi)_i$ параметров процессов с функцией отображения в виде графика бинарных отношений на дугах функционального графа R_{nm_i}: $\hat{\Pi}_i = \left\{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_2, ..., \hat{\pi}_q\right\}_i$, $\tilde{\Pi}_i = \left\{\tilde{\pi}_1, \tilde{\pi}_2, ..., \tilde{\pi}_q\right\}_i$,

$R_{nm_i} = \{r_1, r_2, ..., r_n\}_{m_i}$, $r_{nm_i} = r^+_{nm_i} \cup r^-_{nm_i}$. Для выходного отображения процесса $\tilde{\psi}:(\hat{\Pi} \to \tilde{\Pi})_i$ задается вариант конечного автомата типа «вход-выход» (автомат Мура [15]):

$$\begin{cases} \hat{\pi}_{q_i} = \tilde{\varphi}(\hat{\pi}_{q_{(i-1)}}, r^+_{nm_i}) \\ \tilde{\pi}_{q_i} = \tilde{\psi}(\hat{\pi}_{q_i}, r^+_{nm_i}, r^-_{nm_i}) \end{cases}.$$

Отображение процесса полета АКА с использованием «динамической когнитивной карты» содержит описания не только правил построения взаимосвязей на вершинах и дугах функциональных графов, но и инвестиционных принципов использования описания процессов на нижестоящих стратах для описания процессов в вышестоящих стратах. При переходе к частному случаю отображения процесса управления полетом АКА через функциональные модели такой принцип описания соответствует базисному определению структурно-функциональной операционной (СФО) модели [4]. В соответствии с принятым определением СФО-моделей в понятийно-терминологическом базисе отдельные сложные процессы в виде взвешенных графов с весами дуг, интерпретируемых как «пропускные способности взаимосвязей», относятся к классу потоковых моделей [4]. Веса связей взвешенных графов количественно описывают их пропускную способность. Одной из возможных характеристик потока через дугу графа является интенсивность дискретного потока, определяемая энергетическими показателями управляющих и возмущающих воздействий на внутриэлементные процессы (например, при переходе к функциональному описанию УВ могут формироваться напряжением электрического сигнала 8, 28, 100 и 300 Вольт). Вторичной характеристикой потока является дискретность формирования УВ.

Для получения сложных процессов производится их агрегирование с использованием инвестиционного принципа перехода от процессов более низкого уровня к процессам более высокого уровня. Процедура направлена на укрупнение процессов, в общности отражающих эмерджентные свойства АКА, БС и их элементов с учетом синергетических явлений. Полученную модель принято называть агрегативной [16]. Когнитивное агрегативно-потоковое СФО-моделирование процессов производится в соответствии с предварительно разработанной когнитивной картой (статической когнитивной моделью) процесса управления полетом АКА (см. рис. 1).

Алгоритм построения когнитивно-функциональной агрегативно-потоковой метамодели процесса управления полетом АКА для решения поставленной задачи включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Моделирование процессов, описывающих функционирование элементов.

С учетом взвешенных вершин и дуг функционального графа (рис. 2) концептуальное моделирование процесса функционирования элемента (p =1) $\Pi^{11}_{11(z)}$ на $[t_{(i-1)}, t_i]$-м такте в составе системного процесса s =1, k_s =1 и базового процесса j = 1 АКА производится с использованием матрицы инциденций:

$$M^{11}_{11(z)i}\left[G\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right)_{m_z}, z=\overline{1,6},\ d_{m_z}=\overline{1,9}\right]_{(9\times 6)i} =$$

	$\tilde{\pi}_{z1(i)}$	$\tilde{\pi}_{z2(i)}$	$\tilde{\pi}_{z3(i)}$	$\tilde{\pi}_{z4(i)}$	$\tilde{\pi}_{z5(i)}$	$\tilde{\pi}_{z}$
d_1	r^-_{1i}	0	0	r^+_{1i}	0	
d_2	r^+_{2i}	0	0	r^-_{2i}	0	
d_3	0	r^+_{3i}	0	r^-_{3i}	0	
d_4	0	r^+_{4i}	r^-_{4i}	0	0	
d_5	0	r^-_{5i}	r^+_{5i}	0	0	
d_6	0	0	r^+_{6i}	0	r^-_{6i}	
d_7	0	0	0	0	r^+_{7i}	
d_8	0	0	0	0	r^-_{8i}	
d_9	0	0	0	r^+_{9i}	r^-_{9i}	

(5)

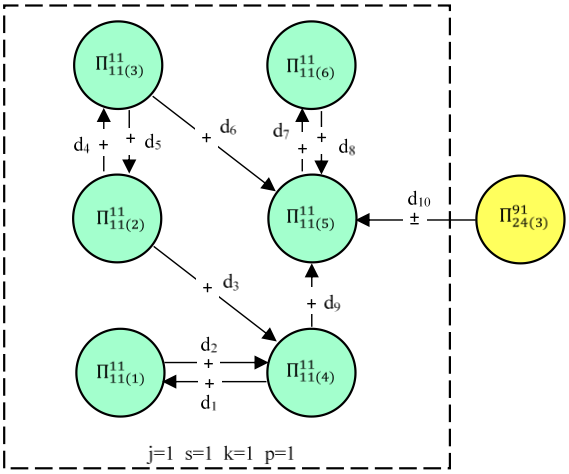


Рис. 2. Граф процесса $\Pi^{11}_{11(z)}$ функционирования элемента

Отображение процесса на уровне элемента задается функцией, определенной на вершинах $\Pi^{11}_{11(z)}$ (где $\hat{\Pi}^{11}_{11(z)} \subset \Pi^{11}_{11(z)}$, $\hat{\Pi}^{11}_{11(z)} = \left\{\hat{\pi}_{z1(i)}, \hat{\pi}_{z2(i)}, \ldots, \hat{\pi}_{zz(i)}\right\}^{11}_{11}$ – множество определений процесса; $\tilde{\Pi}^{11}_{11(z)} \subset \Pi^{11}_{11(z)}$, $\tilde{\Pi}^{11}_{11(z)} = \left\{\tilde{\pi}_{z1(i)}, \tilde{\pi}_{z2(i)}, \ldots, \tilde{\pi}_{zz(i)}\right\}^{11}_{11}$ – множество значений процесса) и дугах $r^{11}_{11\,m_z i} = \left[r^+_{m_z i} \cup r^-_{m_z i}\right]^{11}_{11}$ функционального графа процесса, описывающего функционирование элемента*.

При этом функции рассматриваются как частный случай отображения протекающих процессов. В таком случае переходные отображения процессов $\hat{\pi}^{11}_{11zz\,(i)} = \tilde{\varphi}\left(\hat{\pi}_{zz(i-1)}, r^-_{m_z i}\right)^{11}_{11}$ формируются исходя из физической интерпретации функции входных воздействий через бинарные отношения создаваемых УВ в выходных полюсах вершин с учетом ВВ ($r^{11-}_{11\,m_z i}$), а выходные отображения

* Здесь и далее *n*-е индексы бинаризации в обозначениях отношений УВ и ВВ не используются.

в виде функций самих регуляторов для выдачи в смежные внутриэлементные регуляторы – исходя из физической интерпретации бинарных отношений УВ и ВВ входных ($r^{11+}_{11\,m_z i}$) и выходных ($r^{11-}_{11\,m_z i}$) полюсов вершин:

$$\tilde{\pi}^{11}_{11z1(i)} = \tilde{\psi}_{m_z}\left[\left(r^{+}_{2i}, r^{-}_{1i}\right); r^{+}_{2i} \cap r^{-}_{1i} \neq \varnothing\right]^{11}_{11}$$ и т. д., см. (5).

Физические результаты моделирования каждой функции (например, для процесса $\tilde{\pi}^{11}_{11z1(i)}$) лингвистически интерпретируются следующим образом: на процесс $\tilde{\pi}^{11}_{11z1(i)}$ формирования выходного воздействия (истока) от регулятора, трактуемого бинарным отношением $\left(r^{11+}_{11(z)(2)i}\right)$ УВ и ВВ, оказывает влияние входное воздействие (сток) от процесса $\tilde{\pi}^{11}_{11z4(i)}$, формирующего УВ при наличии ВВ в бинарном отношении $\left(r^{11}_{11(z)(\bar{1})i}\right)$. Начальными значениями для проведения моделирования рассматриваемых процессов являются значения соответствующих параметров процессов, полученные на предыдущем такте $\hat{\pi}^{11}_{11z1(i-1)}$, $\tilde{\pi}^{11}_{11z1(i-1)}$ и т. д. При этом множеству процессов соответствует множество вершин графа

$$\mu\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right) = \left\{\Pi^{11}_{11(1)}, \Pi^{11}_{11(2)}, \ldots, \Pi^{11}_{11(z)},\ z = 1,2,\ldots,6\right\},$$

веса которых определяются элементами множества коэффициентов (множества констант) располагаемого полетного времени по каждому внутриэлементному регулятору [1]:

$$\mu\left[K\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right)\right] = \left\{k^{11}_{11(1)}, k^{11}_{11(2)}, \ldots, k^{11}_{11(z)},\ z = 1,2,\ldots,6\right\}.$$

Каждому элементу множества дуг графа

$$\mu\left[D\left(\Pi^{11}_{11(z)(m_z)}\right)\right] = \left\{d^{11}_{11(z)(1)}, d^{11}_{11(z)(2)}, \ldots, d^{11}_{11(z)(m_z)},\ m_z = 1,2,\ldots,9\right\}$$

соотносится вес исходя из физической интерпретации бинарных отношений в графике, построенном для функционального графа на рис. 2:

$$R\left(\Pi^{11}_{11(z)(m_z)}\right) = \left\{r^{11}_{11(z)(1)}, r^{11}_{11(z)(2)}, \ldots, r^{11}_{11(z)(m_z)},\ m_z = 1,2,\ldots,9\right\},$$

на декартовом произведении двух множеств $\tilde{U}^{11}_{11(z)(m_z)}$ – УВ и $\tilde{\Xi}^{11}_{11(z)(m_z)}$ – ВВ, формирующих множество входных воздействий на внутриэлементные регуляторы элементного процесса $\Pi^{11}_{11(z)}$, с учетом синергетических явлений $\tilde{V}^{11}_{11(z)(m_z)}$ (знак «˜» указывает на индивидуальные свойства, обусловленные неклонируемостью регулятора процесса и наличием в нем синергетических явлений). При этом неклонируемость в детерминированной сетевой модели рассматривается как индивидуальное определенное свойство системы и ее элементов. *По определению физически неклонируемые регуляторы – это системы (устройства) и их элементы, неотъемлемым свойством которых является неклонируемость (неповторяемость) их функций, свойств, характеристик или параметров, поскольку они состоят из множества компонент, параметры которых в процессе создания принимают случайные значения* [6]. Множествам взвешенных вершин $\mu\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right)$ и дуг $\mu\left[D\left(\Pi^{11}_{11(z)(m_z)}\right)\right]$ сопоставляется множество входных воздействий:

$$\tilde{V}^{11}_{11(z)(m_z)} = \tilde{U}^{11}_{11(z)(m_z)} \times \tilde{\Xi}^{11}_{11(z)(m_z)},\ \tilde{U}^{11}_{11(z)(m_z)} = \left\{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3, \tilde{u}_4\right\}^{11}_{11(z)(m_z)},$$

$$\tilde{\Xi}^{11}_{11(z)(m_z)} = \left\{\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \tilde{\xi}_3, \tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5, \tilde{\xi}_6\left(\Pi^{91}_{24(3)}\right)\right\}^{11}_{11(z)(m_z)},$$

$$R\left(\Pi^{11}_{11(z)(m_z)}\right) = \left\{r^{11}_{11(z)(1)}, r^{11}_{11(z)(2)}, \ldots, r^{11}_{11(z)(m_z)}, m_z = 1,2,\ldots,9\right\} \subseteq \tilde{V}^{11}_{11(z)(m_z)} \subset \tilde{V}^{sk_s}_{jp(z)(m_z)}.$$

Общий вид графиков бинарных отношений, построенных для функциональных графов процессов, протекающих в элементах систем, может быть представлен следующим образом:

$$R^{sk_s}_{jp(z)(m_z)} = \left\{r^{sk_s}_{jp(z)(1)}, r^{sk_s}_{jp(z)(2)}, \ldots, r^{sk_s}_{jp(z)(m_z)}\right\} \subseteq \tilde{V}^{sk_s}_{jp(z)(m_z)}.$$

Для учета синергетических явлений во множество возмущающих воздействий вводится дополнительный элемент $\xi_6\left(\Pi^{91}_{24(3)}\right)$:

$$r^{11}_{11(z)(6)} = \left\{<\tilde{u}_2, \left[\tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5, \xi_6\left(\Pi^{91}_{24(3)}\right)\right]>\right\}^{11}_{11(z)(6)} \text{ и т. д.}$$

В других бинарных отношениях УВ и ВВ $r^{11}_{11(z)(1)} = \left\{<\tilde{u}_1, (\tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5)>\right\}^{11}_{11(z)(1)}$, $r^{11}_{11(z)(2)} = \left\{<\tilde{u}_2, (\tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5)>\right\}^{11}_{11(z)(2)}$ и т. д., в соответствии с расположением дуг функционального графа дополнительное ВВ не учитывается. В общем случае дополнительное синергетическое воздействие от процесса $\left(\Pi^{91}_{24(3)}\right)$ необходимо рассматривать в плане как положительного, так и отрицательного влияния. При наличии прочих синергетических воздействий каждое включается в моделируемый процесс, представленный взвешенным функциональным графом [13] сложного процесса, протекающего в элементе (см. рис. 2):

$$G\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right) = <\mu\left[\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right), K\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right), D\left(\Pi^{11}_{11(z)(m_z)}\right), R\left(\Pi^{11}_{11(z)(m_z)}\right)\right]>,$$

определяющим на вершинах и дугах зависимость между процессами в регуляторах внутриэлементных процессов с учетом расходуемых ресурсов при их управлении в составе регулятора сложного процесса в элементе.

Моделирование процессов в регуляторах элементов позволяет проводить их агрегирование для анализа взаимодействия в устройствах.

Агрегат сложного процесса $\Pi^{11}_{11(z)}$, протекающего в элементе, формируется на основе выполнения операции покрытия семейства множеств параметров простых процессов, протекающих в его устройствах:

$$A_G\left(\Pi^{11}_{11}\right)_z = \left\{\bigcup_{z=1}^{6}\left(\Pi^{11}_{11(z)}\right),\ \Pi^{11}_{11(z)} \bigcap \Pi^{11}_{11(z+1)} \neq \varnothing, \forall_z \in \{1,2,\ldots,6\}\right\}.$$

Шаг 2. Моделирование процессов, описывающих функционирование систем.

С учетом взвешенных вершин и дуг функционального графа (рис. 3) $\Pi^{11}_{1(p)}$ моделирование функционирования системы АКА (s =1, k_s =1) на [$t_{(i-1)}$, t_i]-м такте в составе БП j =1 производится с использованием матрицы инциденций:

$$M^{11}{}_{I(p)i}\left[G\left(\Pi^{11}_{1(p)}\right)_{m_p},\ p=\overline{1,4},\ d_{m_p}=\overline{1,7}\right]_{(7\times 4)i}=$$

	$\tilde{\pi}_{p1(i)}$	$\tilde{\pi}_{p2(i)}$	$\tilde{\pi}_{p3(i)}$	$\tilde{\pi}_{p4(i)}$	11
d_1	r^+_{1i}	r^-_{1i}	0	0	
d_2	r^-_{2i}	r^+_{2i}	0	0	
d_3	r^+_{3i}	0	r^-_{3i}	0	
d_4	0	r^-_{4i}	r^+_{4i}	0	
d_5	0	r^+_{5i}	0	r^-_{5i}	
d_6	r^-_{6i}	0	0	r^+_{6i}	1
d_7	0	0	r^+_{7i}	r^-_{7i}	

(6)

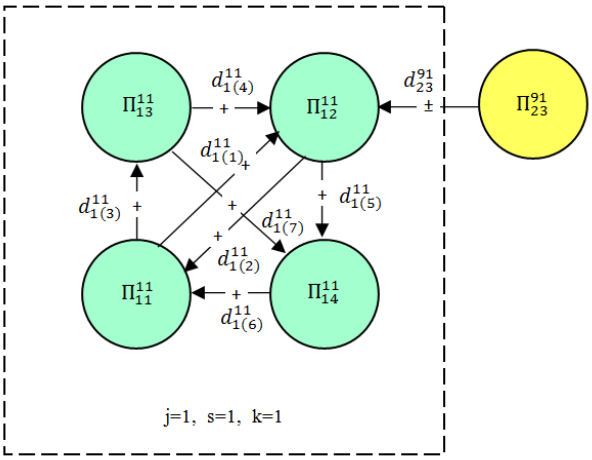


Рис. 3. Граф процесса $\Pi^{11}_{1(p)}$ функционирования системы

Отображение процесса на уровне системы задается функцией, определенной на вершинах $\Pi^{11}_{1(p)}$ (где $\hat{\Pi}^{11}_{1(p)} \subset \Pi^{11}_{1(p)}$, $\hat{\Pi}^{11}_{1(p)} = \left\{\hat{\pi}_{p1(i)}, \hat{\pi}_{p2(i)}, \ldots, \hat{\pi}_{pp(i)}\right\}^{11}_{1}$ – множество определений процесса; $\tilde{\Pi}^{11}_{1(p)} \subset \Pi^{11}_{1(p)}$, $\tilde{\Pi}^{11}_{1(p)} = \left\{\tilde{\pi}_{p1(i)}, \tilde{\pi}_{p2(i)}, \ldots, \tilde{\pi}_{pp(i)}\right\}^{11}_{1}$ – множество значений процесса) и дугах $r_1{}^{11}{}_{m_p i} = \left[r^+_{m_p i} \cup r^-_{m_p i}\right]^{11}_{1}$ функционального графа процесса, описывающего функционирование системы.

При этом функции рассматриваются как частный случай отображения процессов. В таком случае переходные отображения процессов $\hat{\pi}^{11}_{1pp(i)} = \tilde{\varphi}\left(\hat{\pi}_{pp(i-1)}, r^-_{m_p i}\right)^{11}_{1}$ формируются исходя из физической интерпретации функции входных воздействий через бинарные отношения создаваемых УВ в выходных полюсах вершин с учетом ВВ ($r_1{}^{11-}{}_{m_p i}$), а выходные отображения в виде функций самих регуляторов для выдачи в смежные регуляторы элементов – исходя из физической интерпретации бинарных отношений входных ($r_1{}^{11+}{}_{m_p i}$) и выходных ($r_1{}^{11-}{}_{m_p i}$) полюсов вершин:

$\tilde{\pi}^{11}_{1p1(i)} = \tilde{\psi}_{m_p}\left[(r^+_{1i}, r^+_{3i}, r^-_{2i}, r^-_{6i}); r^+_{1i} \cap r^-_{2i} \neq \varnothing; r^+_{1i} \cap r^-_{6i} \neq \varnothing; r^+_{3i} \cap r^-_{2i} \neq \varnothing; r^+_{3i} \cap r^-_{6i} \neq \varnothing\right]^{11}_{1}$ и т. д., см. (6).

Начальными значениями параметров для проведения моделирования рассматриваемых процессов являются значения соответствующих параметров процессов, полученные на предыдущем такте $\hat{\pi}^{11}_{1p(i-1)}$, $\tilde{\pi}^{11}_{1p1(i-1)}$ и т. д. В соответствии с принципом инвестиций процессов страт более низкого уровня в процессы страт верхнего уровня состав сложного системного процесса $\Pi^{11}_{1(p)}$ первой системы ($s=1$), первой конфигурации ($k_s=1$) в рассмотренном примере первого БП ($j=1$) содержит множество p-х элементных процессов (рис. 4):

$$\mu\left(\Pi^{11}_{1(p)}\right)=\left\{\Pi^{11}_{1(1)},\Pi^{11}_{1(2)},\ldots,\Pi^{11}_{1(p)},\ \ p=1,2,3,4\right\}.$$

Веса вершин определяются соответствующими компонентами множества коэффициентов располагаемого полетного времени по каждому элементному регулятору процесса:

$$\mu\left[K\left(\Pi^{11}_{1(p)}\right)\right]=\left\{k^{11}_{1(1)},k^{11}_{1(2)},\ldots,k^{11}_{1(p)},\ \ p=1,2,3,4\right\}.$$

Каждой дуге графа из множества

$$\mu\left[D\left(\Pi^{11}_{1(p)(m_p)}\right)\right]=\left\{d^{11}_{1(p)(1)},d^{11}_{1(p)(2)},\ldots,d^{11}_{1(p)(m_p)},\ \ m_p=1,2,\ldots,7\right\}$$

соотносится вес исходя из физической интерпретации бинарных отношений в графике, построенном для функционального графа на рис. 4:

$$R\left(\Pi^{11}_{1(p)(m_p)}\right)=\left\{r^{11}_{1(p)(1)},r^{11}_{1(p)(2)},\ldots,r^{11}_{1(p)(m_p)},\ \ m_p=1,2,\ldots,7\right\}.$$

Бинарные отношения построены на декартовом произведении двух множеств $\tilde{U}^{11}_{1(p)(m_p)}$ – управляющих и $\tilde{\Xi}^{11}_{1(p)(m_p)}$ – возмущающих воздействий, формирующих множество входных воздействий $\tilde{V}^{11}_{1(p)(m_p)}$ на регуляторы в элементах системного процесса $\Pi^{11}_{1(p)}$ с учетом синергетических явлений:

$$\tilde{V}^{11}_{1(p)(m_p)}=\tilde{U}^{11}_{1(p)(m_p)}\times\tilde{\Xi}^{11}_{1(p)(m_p)},\ \tilde{U}^{11}_{1(p)(m)}=\{\tilde{u}_1,\tilde{u}_2,\tilde{u}_3,\tilde{u}_4\}^{11}_{1(p)(m_p)},$$

$$\tilde{\Xi}^{11}_{1(p)(m_p)}=\left\{\tilde{\xi}_1,\tilde{\xi}_2,\tilde{\xi}_3,\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5,\tilde{\xi}_6\left(\Pi^{91}_{23}\right)\right\}^{11}_{1(p)(m_p)},$$

$$R\left(\Pi^{11}_{1(p)(m_p)}\right)=\left\{r^{11}_{1(p)(1)},r^{11}_{1(p)(2)},\ldots,r^{11}_{1(p)(m_p)},m_p=1,2,\ldots,7\right\}\subseteq\tilde{V}^{11}_{1(p)(m_p)}\subset\tilde{V}^{sk_s}_{j(p)(m_p)}.$$

При этом на один из штатных процессов в регуляторах элементов оказывает влияние внешний (синергетический) процесс $\left(\Pi^{91}_{23}\right)$ от другого регулятора (знак дуги «±»), не имеющего непосредственной функциональной связи и энергетически взаимодействующего через физическое поле (например, электростатическое):

$$r^{11}_{1(p)(1)}=\left\{\tilde{u}_2,<\left[\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5,\xi_6\left(\Pi^{91}_{23}\right)\right]>\right\}^{11}_{1(p)(1)},\ \ r^{11}_{1(p)(4)}=\left\{<\tilde{u}_1,\left[\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5,\tilde{\xi}_6\left(\Pi^{91}_{23}\right)\right]>\right\}^{11}_{1(p)(4)}.$$

В других бинарных отношениях УВ и ВВ $r^{11}_{1(p)(2)}=\left\{\tilde{u}_1,<(\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5)>\right\}^{11}_{1(p)(2)}$, $r^{11}_{1(p)(3)}=\left\{\tilde{u}_2,<(\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5)>\right\}^{11}_{1(p)(3)}$ и т. д., дополнительное ВВ не учитывается.

Множества взвешенных вершин $\mu(\Pi^{11}_{1(p)})$ и дуг $\mu[D(\Pi^{11}_{1(p)(m_p)})]$ определяют в совокупности функциональный взвешенный граф [13] (см. рис. 4)

$$G\left(\Pi^{11}_{1(p)}\right)=<\mu[(\Pi^{11}_{1(p)}),K\left(\Pi^{11}_{1(p)}\right),\ D\left(\Pi^{11}_{1(p)(m_p)}\right),\ R\left(\Pi^{11}_{1(p)(m_p)}\right)]>,$$

задающий своими вершинами и дугами связь между ресурсами регуляторов p-х элементных процессов при их управлении в составе регулятора системного сложного процесса. Агрегат сложного процесса $\Pi_{1(p)}^{11}$, протекающего в системе, формируется на основе выполнения операции покрытия семейства множеств параметров простых процессов, протекающих в элементах систем:

$$A_{G_i}\left(\tilde{\pi}_1^{11}\right)_p = \left\{ \bigcup_{p=1}^{4} \left(\tilde{\pi}_{1(p)}^{11}\right),\ \tilde{\pi}_{1(p)}^{11} \bigcap \tilde{\pi}_{1(p+1)}^{11} \neq \varnothing, \forall_p \in \{1,\ldots,4\} \right\}_i .$$

Шаг 3. Моделирование базовых процессов.

С учетом взвешенных вершин и дуг функционального графа (см. рис. 4) концептуальное моделирование первого базового процесса (j = 1), происходящего на уровне АКА $\Pi_1^{(s)(k_s)}$, на $[t_{(i-1)}, t_i]$-м такте производится с использованием матрицы инциденций:

$$M_{1_i}^{(s)(k_s)} \left[G\left(\Pi_1^{(s)(k_s)}\right)_{m_{s,k_s}}, s=\overline{1,5},\ k_s=1, d_{m_{s,k_s}}=\overline{1,8} \right]_{(8\times 5)i} = \begin{array}{c|ccccc} & \tilde{\pi}_{s1(i)} & \tilde{\pi}_{s2(i)} & \tilde{\pi}_{s5(i)} & \tilde{\pi}_{s4(i)} & \tilde{\pi}_{s5(i)} \\ \hline d_1 & r_{1i}^- & 0 & r_{1i}^+ & 0 & 0 \\ d_2 & r_{2i}^+ & 0 & r_{2i}^- & 0 & 0 \\ d_3 & 0 & 0 & r_{3i}^+ & r_{3i}^- & 0 \\ d_4 & 0 & 0 & r_{4i}^- & r_{4i}^+ & 0 \\ d_5 & 0 & r_{5i}^- & 0 & r_{5i}^+ & 0 \\ d_6 & r_{6i}^+ & r_{6i}^- & 0 & 0 & 0 \\ d_7 & 0 & r_{7i}^+ & 0 & 0 & r_{7i}^- \\ d_8 & r_{8i}^- & 0 & 0 & 0 & r_{8i}^+ \end{array}_1 \quad (7)$$

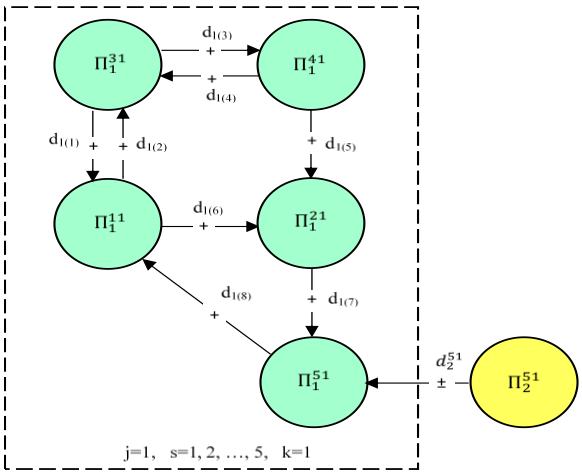


Рис. 4. Функциональный граф базового процесса $\Pi_1^{(s)(k_s)}$

Отображение на уровне БП задается функцией, определенной на вершинах $\Pi_1^{(s)(k_s)}$, (где $\hat{\Pi}_1^{(s)(k_s)} \subset \Pi_1^{(s)(k_s)}$, $\hat{\Pi}_1^{(s)(k_s)} = \left\{\hat{\pi}_{s1(i)}, \hat{\pi}_{s2(i)}, \ldots, \hat{\pi}_{ss(i)}\right\}_1$ – множество определений процесса; $\tilde{\Pi}_1^{(s)(k_s)} \subset \Pi_1^{(s)(k_s)}$, $\tilde{\Pi}_1^{(s)(k_s)} = \left\{\tilde{\pi}_{s1(i)}, \tilde{\pi}_{s2(i)}, \ldots, \tilde{\pi}_{ss(i)}\right\}_1$ – множество значений процесса) и дугах $r_{1\,m_{s,k_s}i} = \left[r_{m_{s,k_s}i}^+ \cup r_{m_{s,k_s}i}^- \right]_1$ функционального графа процессов, протекающих в системах. При этом в регуляторах функции

рассматриваются как частный случай отображения процессов. В регуляторе БП выходные функции отображения процессов зависят от переходных отображений $\hat{\pi}_{1ss\,(i)} = \tilde{\varphi}\left(\hat{\pi}_{ss(i-1)}, r^{-}_{m_{s,k_s}\,i}\right)_1$, формируемых исходя из физической интерпретации бинарных отношений выходных полюсов вершин ($r^{-}_{1m_{s,k_s}\,i}$). Выходные отображения в виде функций регуляторов в системных процессах для выдачи в смежные регуляторы систем формируются исходя из физической интерпретации бинарных отношений входных ($r^{+}_{1m_{s,k_s}\,i}$) и выходных ($r^{-}_{1m_{s,k_s}\,i}$) полюсов вершин:

$\tilde{\pi}_{1s1(i)} = \tilde{\psi}_{m_{s,k_s}}\left[\left(r^{+}_{2i}, r^{+}_{6i}, r^{-}_{1i}, r^{-}_{8i}\right); r^{+}_{2i} \cap r^{-}_{1i} \neq \varnothing; r^{+}_{2i} \cap r^{-}_{8i} \neq \varnothing; r^{+}_{6i} \cap r^{-}_{1i} \neq \varnothing; r^{+}_{6i} \cap r^{-}_{8i} \neq \varnothing\right]_1$ и т. д., см. (7).

Начальными значениями параметров для проведения моделирования рассматриваемых процессов являются значения соответствующих параметров процессов, полученные в предыдущем такте $\hat{\pi}_{1s1(i-1)}, \tilde{\pi}_{1s1(i-1)}$ и т. д.

В соответствии с принципом инвестиций процессов страт более низкого уровня в процессы страт верхнего уровня состав сложного БП $\Pi_1^{(s)(k_s)}$ в рассматриваемом примере (см. рис. 4) содержит множество системных «s»-х процессов первых комплектов ($k_s=1$):

$$\mu\left(\Pi_1\right) = \left\{\Pi_1^{11}, \Pi_1^{21}, \ldots, \Pi_1^{(s)1},\ s = 1,2,\ldots,5, k_s = 1\right\}.$$

Функциональные системные процессы ($s = 1,\ldots,5$) отвечают множеству вершин графа. Веса вершин определяются соответствующими элементами множества коэффициентов располагаемого полетного времени по каждому системному регулятору:

$$\mu\left[K\left(\Pi_1^{(s)(k_s)}\right)\right] = \left\{k_1^{11}, k_1^{21}, \ldots, k_1^{(s)1},\ s = 1,2,\ldots,5, k_s = 1\right\}.$$

Каждой дуге графа из множества

$$\mu\left[D\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}\right)\right] = \left\{d^{(s)(k_s)}_{1(1)}, d^{(s)(k_s)}_{1(2)}, \ldots, d^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})},\ m_{s,k_s} = 1,2,\ldots,8\right\}$$

соотносится вес исходя из физической интерпретации бинарных отношений в графике, построенном для функционального графа на рис. 4:

$$R\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}\right) = \left\{r^{(s)(k_s)}_{1(1)}, r^{(s)(k_s)}_{1(2)}, \ldots, r^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})},\ m_{s,k_s} = 1,2,\ldots,8\right\},$$

на декартовом произведении двух множеств $\tilde{U}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}$ – управляющих и $\tilde{\Xi}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}$ – возмущающих воздействий, формирующих множество входных воздействий на системные регуляторы БП $\Pi_1^{(s)(k_s)}$ с учетом синергетических явлений $\tilde{V}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}$

$$\tilde{V}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})} = \tilde{U}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})} \times \tilde{\Xi}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}, \tilde{U}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})} = \left\{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3, \tilde{u}_4\right\}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})},$$

$$\tilde{\Xi}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})} = \left\{\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \tilde{\xi}_3, \tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5, \tilde{\xi}_6\left(\Pi_2^{51}\right)\right\}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})},$$

$$R\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}\right)=\left\{r^{(s)(k_s)}_{1(1)},r^{(s)(k_s)}_{1(2)},\ldots,r^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})},m_{s,k_s}=1,2,\ldots,8\right\}\subseteq\tilde{V}^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}\subset\tilde{V}^{(s)(k_s)}_{j(m_{s,k_s})},$$

$$R(\Pi)^{(s)(k_s)}_{j(m_{s,k_s})}=\left\{r^{(s)(k_s)}_{j(1)},r^{(s)(k_s)}_{j(2)},\ldots,r^{(s)(k_s)}_{j(m_{s,k_s})}\right\}\subseteq\tilde{V}^{(s)(k_s)}_{j(m_{s,k_s})}.$$

При этом на один из штатных системных процессов оказывает влияние внешний (синергетический) системный процесс $\left(\Pi^{51}_{2}\right)$ другого регулятора:

$$r^{(s)(k_s)}_{1(7)}=\left\{<\tilde{u}_2,(\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5,\xi_6\left(\Pi^{51}_{(2)}\right)>\right\}^{(s)(k_s)}_{1(7)}.$$

В других графиках бинарных отношений $r^{(s)(k_s)}_{1(2)}=\left\{<\tilde{u}_1,(\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5)>\right\}^{(s)(k_s)}_{1(2)}$, $r^{(s)(k_s)}_{1(3)}=\left\{<\tilde{u}_2,(\tilde{\xi}_4,\tilde{\xi}_5)>\right\}^{(s)(k_s)}_{1(3)}$ и т. д. дополнительное ВВ не учитывается. Множества взвешенных вершин $\mu\left[K\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1}\right)\right]$ и дуг $\mu\left[D\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}\right)\right]$ определяют в совокупности взвешенный граф [13] сложного БП (см. рис. 4):

$$G\left(\Pi^{s,k_s}_{1}\right)=<\mu\left[\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1}\right),K\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1}\right),\ D\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}\right),R\left(\Pi^{(s)(k_s)}_{1(m_{s,k_s})}\right)\right]>,$$

который является функциональным графом, определяющим на вершинах и дугах функциональную зависимость между ресурсами регуляторов системных процессов и их управлением в составе АКА как регулятора сложного БП Π_1.

Агрегат сложного БП $\Pi^{(s)(k_s)}_{1}$ является покрытием семейства множеств параметров простых системных процессов:

$$A_{G\ i}\left(\Pi_1\right)_{s,k_s}=\left\{\bigcup_{\substack{s=1\\k_s=1}}^{5,1}\left(\Pi^{(s)(k_s=1)}_{1}\right),\ \Pi^{(s)(k_s=1)}_{1}\bigcap\Pi^{(s+1)(k_s=1)}_{1}\neq\varnothing,\forall_s\in\{1,\ldots,5\},k_s=1\right\}_i.$$

Шаг 4. Моделирование процесса управления полетом АКА.

С учетом взвешенных вершин и дуг функционального графа (рис. 5) концептуальное моделирование сложного процесса Π_Σ управления полетом АКА на $[t_{(i-1)}, t_i]$-м такте производится с помощью матрицы инциденций:

$$M_{\Sigma(j)i}\left[G_{\Sigma}\left(\Pi_{(j)}\right)_{m_j}, j=\overline{1,5}, m_j=\overline{1,12}\right]_{(12\times 5)} =$$

	$\tilde{\pi}_{j1(i)}$	$\tilde{\pi}_{j2(i)}$	$\tilde{\pi}_{j3(i)}$	$\tilde{\pi}_{j4(i)}$	$\tilde{\pi}_{j5(i)}$
d_1	r^{+}_{1i}	r^{-}_{1i}	0	0	0
d_2	r^{-}_{2i}	0	r^{+}_{2i}	0	0
d_3	r^{+}_{3i}	0	r^{-}_{3i}	0	0
d_4	0	r^{+}_{4i}	0	r^{-}_{4i}	0
d_5	0	0	r^{-}_{5i}	r^{+}_{5i}	0
d_6	0	0	r^{+}_{6i}	r^{-}_{6i}	0
d_7	0	r^{+}_{7i}	r^{-}_{7i}	0	0
d_8	0	r^{-}_{8i}	r^{+}_{8i}	0	0
d_9	0	0	r^{+}_{9i}	0	r^{-}_{9i}
d_{10}	0	0	r^{-}_{10i}	0	r^{+}_{10i}
d_{11}	0	0	0	r^{+}_{11i}	r^{-}_{11i}
d_{12}	r^{-}_{12i}	0	0	r^{+}_{12i}	0

Σ (8)

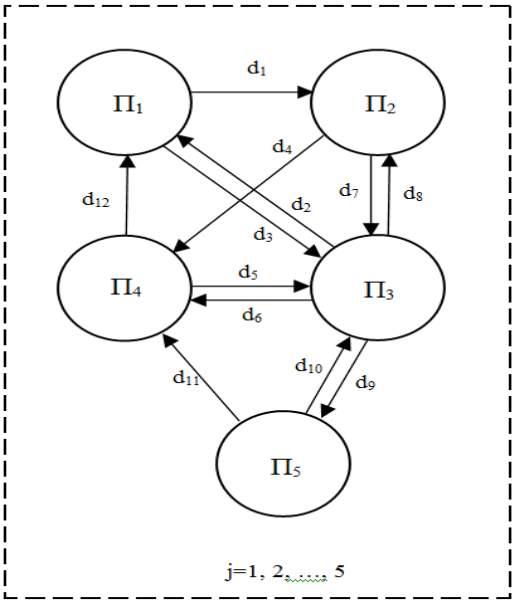


Рис. 5. Функциональный граф процесса Π_{Σ} управления полетом АКА

Отображение процесса на уровне аппарата задается функцией, определенной на вершинах $\Pi_{\Sigma(j)}$ (где $\hat{\Pi}_{\Sigma(j)} \subset \Pi_{\Sigma(j)}, \hat{\Pi}_{\Sigma(j)} = \left\{\hat{\pi}_{j1(i)}, \hat{\pi}_{j2(i)}, ..., \hat{\pi}_{jj(i)}\right\}_{\Sigma}$ – множество определений БП; $\tilde{\Pi}_{\Sigma(j)} \subset \Pi_{\Sigma(j)}, \tilde{\Pi}_{\Sigma(j)} = \left\{\tilde{\pi}_{z1(i)}, \tilde{\pi}_{z2(i)}, ..., \tilde{\pi}_{zz(i)}\right\}_{\Sigma}$ – множество значений БП) и дугах $r_{m_j i} = \left[r^{+}_{m_j i} \cup r^{-}_{m_j i}\right]_{\Sigma}$ функционального графа БП.

В регуляторах БП сложного процесса управления полетом АКА выходные функции отображения БП зависят от переходных отображений

$\hat{\pi}_{\Sigma jj(i)} = \tilde{\varphi}\left(\hat{\pi}_{jj(i-1)}, r^{-}_{m_j i}\right)_{\Sigma}$, формируемых исходя из физической интерпретации бинарных отношений выходных полюсов вершин ($r^{-}_{\Sigma m_j i}$). В самих регуляторах выходные воздействия для выдачи в смежные регуляторы базовых процессов формируются исходя из физической интерпретации бинарных отношений входных ($r^{+}_{\Sigma m_j i}$) и выходных ($r^{11-}_{11\, m_z i}$) полюсов вершин:

$$\tilde{\pi}_{\Sigma j1(i)} = \tilde{\psi}_{m_j}\left[\left(r^{+}_{1i}, r^{+}_{3i}, r^{-}_{2i}, r^{-}_{12i}\right); r^{+}_{1i} \cap r^{-}_{2i} \neq \varnothing; r^{+}_{1i} \cap r^{-}_{12i} \neq \varnothing; r^{+}_{3i} \cap r^{-}_{2i} \neq \varnothing; r^{+}_{3i} \cap r^{-}_{12i} \neq \varnothing\right]_{\Sigma}$$ и т. д., см. (8).

Начальными значениями параметров для проведения моделирования рассматриваемых процессов являются значения соответствующих параметров процессов, полученные на предыдущем такте $\hat{\pi}_{\Sigma j1(i-1)}, \tilde{\pi}_{\Sigma j1(i-1)}$ и т. д.

В соответствии с принципом инвестиций процессов страт более низкого уровня в процессы страт верхнего уровня процесс Π_{Σ} управления полетом АКА на верхнем уровне содержит *j*-е базовые процессы $\Pi_{\Sigma} = \left\{\Pi_1, \Pi_2, ..., \Pi_j\right\}$ (см. рис. 1, $j = \overline{1,5}$). Функциональные БП соответствуют множеству вершин графа (см. рис. 5). Веса вершин определяются элементами множества коэффициентов располагаемого полетного времени по каждому регулятору базового процесса:

$$\mu\left[K\left(\Pi_{(j)}\right)\right] = \left\{k_1, k_2, ..., k_j,\ j = 1,2,...,5\right\}.$$

Каждой дуге графа из множества

$$\mu\left[D\left(\Pi_{(j)(m_j)}\right)\right] = \left\{d_1, d_2, ..., d_{m_j},\ m = 1,2,...,12\right\}$$

соотносится вес исходя из физической интерпретации бинарных отношений в графике, построенном для функционального графа на рис. 5:

$$R\left(\Pi_{(j)(m_j)}\right) = \left\{r_{(j)(1)}, r_{(j)(2)}, ..., r_{(j)(m_j)},\ m_j = 1,2,...,12\right\},$$

на декартовом произведении двух множеств $\tilde{U}_{(j)(m_j)}$ – управляющих воздействий и $\tilde{\Xi}_{(j)(m_j)}$ – возмущающих воздействий, формирующих множество входных воздействий на АКА с учетом синергетических явлений $\tilde{V}_{(j)(m)}$

$$\tilde{V}_{(j)(m)} = \tilde{U}_{(j)(m_j)} \times \tilde{\Xi}_{(j)(m_j)}, \tilde{U}_{(j)(m_j)} = \left\{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3, \tilde{u}_4\right\}_{(j)(m_j)}, \tilde{\Xi}_{(j)(m)} = \left\{\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \tilde{\xi}_3, \tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5\right\}_{(j)(m_j)}$$

$$r_{11} = \left\{<\tilde{u}_1, (\tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5)>\right\}_{11},\ r_{23} = \left\{<\tilde{u}_2, (\tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5)>\right\}_{23}, r_{32} = \left\{<\tilde{u}_1, (\tilde{\xi}_3, \tilde{\xi}_4)>\right\}_{32}$$ и т. д.,

$$R_{(j)(m_j)} = \left\{r_{(j)(1)}, r_{(j)(2)}, ..., r_{(j)(m_j)}, m_j = 1,2,...12\right\} \subseteq \tilde{V}_{(j)(m_j)}.$$

Множества взвешенных вершин $\mu\left[K\left(\Pi_{(j)}\right)\right]$ и дуг $\mu\left[D\left(\Pi_{(j)(m_j)}\right)\right]$ описывают в совокупности взвешенный функциональный граф [10] процесса управления полетом АКА:

$$G\left(\Pi_{\Sigma}\right) = <\mu\left[\left(\Pi_{(j)}\right), K\left(\Pi_{(j)}\right),\ D\left(\Pi_{(j)(m_j)}\right), R\left(\Pi_{(j)(m_j)}\right)\right]>,$$

отражающий на вершинах и дугах зависимость между ресурсами АКА, распределенными по БП.

Агрегат сложного процесса управления полетом АКА Π_{Σ} формируется на основе выполнения операции покрытия семейства множеств параметров базовых процессов

$$A_{G_i}\left(\Pi_{\Sigma}\right)_j = \left\{ \bigcup_{j=1}^{5} \left(\tilde{\pi}_j\right),\ \tilde{\pi}_j \bigcap \tilde{\pi}_{j+1} \neq \varnothing, \forall j \in \{1,...,5\} \right\}_i ;$$

$$A_{G_i}\left(\Pi_{\Sigma}\right)_j = \left\{ \bigcup_{j=1}^{5} \left(\tilde{\pi}_j\right),\ \tilde{\pi}_j \bigcap \tilde{\pi}_{j+1} \neq \varnothing, \forall j \in \{1,...,5\} \right\}_i .$$

Когнитивно-графическое отображение агрегативно-потоковой метамодели, решение проблем размерности и сложности

Функциональная модель сложного процесса управления полетом АКА формируется путем описания процессов в материальных объектах управления на каждом уровне когнитивной карты процесса управления полетом АКА и координирующего механизма их интеграции, обеспечивающего достижение поставленной цели при переходе с уровня на уровень.

Предлагаемая лингвистическая интерпретация координирующего механизма заключается в содержательном описании взаимосвязей и взаимодействий сложных процессов, происходящих на верхних уровнях предложенного ранее стратифицированного представления АКА как объекта управления с процессами, происходящими на нижних стратах предлагаемой концептуальной модели. Например, работа гироскопического измерителя вектора угловой скорости АКА (датчика угловой скорости (ДУС)), элемента в системе управления движением (СУД) зависит от функционирования основного внутриэлементного устройства – поплавкового гироскопа (ПГ). В таком случае координирующий механизм зависимостей протекания БП «движение АКА относительно центра масс» заключается в описании: внутриэлементного процесса в ПГ; процесса функционирования ДУС, включающего процесс в ПГ; процесса функционирования ДУС в составе СУД; целевого БП процесса функционирования, включающего процесс СУД в совокупности процессов, протекающих в других системах. Очевидно, от номинального функционирования ПГ зависит решение задач, стоящих перед БП, в частности построение и поддержание ориентации, программные развороты АКА.

Синергетические явления, возникающие в исследуемых процессах, невозможно изучать путем наблюдения только за БП, так как состояние АКА и его управляющей подсистемы описывается интегральными (обобщенными) параметрами целевых процессов, происходящих на уровне АКА и характеризующих, например, «построение орбитальной ориентации», «состояние энергобаланса», «выполнение коррекции орбиты» и др. сформированные процессы более низкого уровня. Чем ниже по иерархии производятся исследования, тем более детальным становится описание процессов. Наиболее продуктивна регистрация изменений в процессах при их самой низкой дифференциации на внутриэлементные процессы в страте 4-го уровня. При этом описания одних причинно-следственных связей в когнитивной карте недостаточно для проведения анализа протекания процессов в регуляторах с учетом синергетических явлений. Необходимы знания

о степени взаимовлияния процессов через множество пересекающихся (взаимозависимых) параметров, чтобы локализовать их в каждом регуляторе процесса, выделить основные (штатные) и внешние (синергетические) процессы для их анализа и определения степени взаимосвязей и взаимодействий.

Для описания инвестиционных переходов и взаимодействий процессов на уровне страт удобно использовать когнитивно-графическое представление агрегативно-потоковой метамодели сложного процесса управления полетом АКА (см. рис. 6 с обозначениями, соответствующими ранее введенным), позволяющее выделять для анализа отдельные информационно взаимосвязанные и взаимодействующие объекты – кластеры процессов [5]. Набор правил для алгоритма построения рассматриваемой в статье модели подчиняется инвестиционному принципу. Агрегаты сложных элементных процессов $A_G\left(\Pi_{jp}^{s,k_s}\right)_z$, задаваемые с помощью матриц инцидентности, объединяют в себе первичные простые взаимосвязанные внутриэлементные процессы, формируя новые параметры сложных процессов в элементах систем. Модель сложного процесса, происходящего в элементе, сохраняет все его свойства для изучения с переводом образа процесса в компактное изображение в виде диаграмм Эйлера – Венна. На страте каждого уровня в иерархии сложного процесса управления полетом АКА существует свой набор параметров, который позволяет в значительной степени ограничить изучение их взаимосвязей стратой данного уровня. Относительная независимость процессов на стратах предоставляет возможность более глубокого и детального их изучения. Однако экспериментально доказано, что предположение о полной независимости процессов на отдельных стратах неоправданно и приводит к неполному пониманию поведения сложных процессов на стратах более высокого уровня, содержащих процессы более низкого уровня. Поэтому после описания каждого из сложных процессов на элементном уровне в регуляторах (в отдельных приборах и узлах) производится их комплексирование в агрегаты сложных системных процессов страты 2-го уровня $A_G\left(\Pi_j^{s,k_s}\right)_p$. При этом модель каждого процесса, протекающего в элементе, рассматривается как модель первичного простого процесса в сложном системном процессе.

Далее проводится исследование сложных процессов на элементном уровне в составе сложных системных процессов (описание работы отдельных приборов в составе системы). Если описания на вышестоящем и нижестоящем уровнях совпадают, то процесс на элементном уровне идентифицируют, в противоположном случае проводятся дополнительные исследования с целью определения синергетического взаимодействия между внутриэлементными процессами на уровне страты С4, которые в составе системных процессов проявляются как дополнительные свойства. Введенный инвестиционный принцип дуализма позволяет рассматривать процессы в элементах как «простые» в составе сложного системного процесса. Аналогичным образом производятся моделирование и проверка взаимодействия системных процессов страты 2-го уровня после их агрегирования в БП страты 1-го уровня $A_G\left(\Pi_j\right)_{s,k_s}$.

Если отображение сложных системных процессов соответствует их описанию через сложные процессы в элементах, то системные процессы идентифицируют. В противоположном случае производится исследование поведения систем с целью определения межсистемных синергетических явлений и их анализа. При этом «простыми» считаются системные процессы в составе базового процесса.

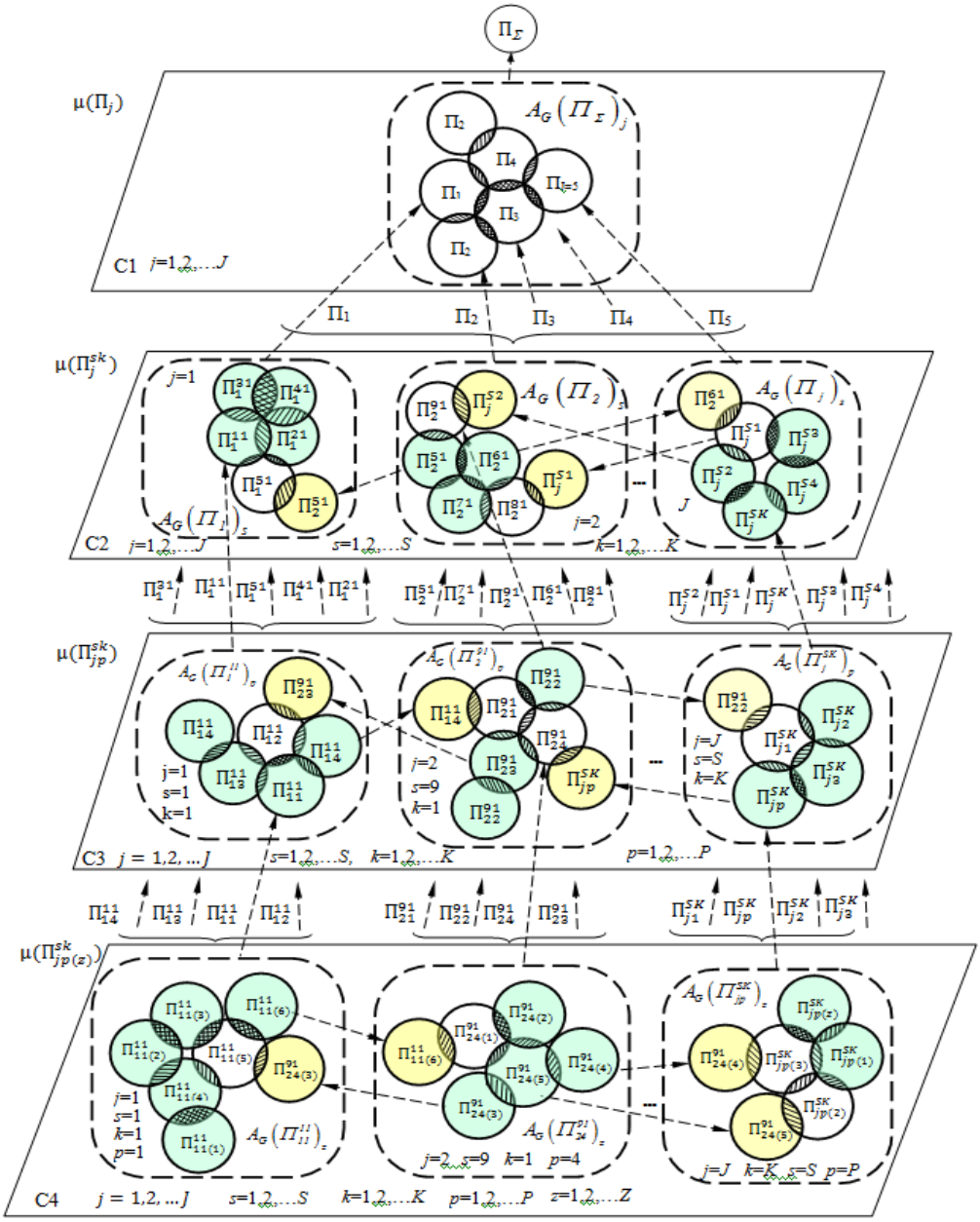


Рис. 6. Когнитивно-графическое представление агрегативно-потоковой метамодели процесса управления полетом АКА

Агрегат сложного процесса управления полетом аппарата $A_{G_\Sigma}\left(\Pi_\Sigma\right)_j$ задается с использованием матрицы инцидентности, определяющей взаимодействие базовых процессов. При этом базовые процессы являются «простыми» по отношению к сложному процессу управления полетом АКА. Например, «простым» можно считать базовый процесс «Управление движением относительно центра масс», так как его можно отображать одной математической моделью с использованием кинематических и динамических дифференциальных уравнений движения АКА

[17]. Результаты моделирования верифицируются на основе оценивания состояния БС в составе БП путем сопоставления значений контролируемых параметров на материальной модели с прогнозируемыми значениями. Точность математического прогноза изменения вектора кинетического момента на борту АКА при поддержании ориентации на заданном интервале оценивается через измерение компонент вектора на том же интервале и определения ошибки в расхождении измеренных и прогнозируемых значений [18]. Критерием для оценки близости (адекватности) моделируемого базового процесса реальному является точность поддержания ориентации АКА при использовании прогнозируемых значений вектора кинетического момента в формировании закона управления угловым движением аппарата.

Ранее уже было сказано, что АКА одновременно является сложной технической системой с гносеологической и онтологической позиций, а также большой системой по размерности и суперсложности [4, 16]. Для решения проблемы комплексного моделирования АКА как системы большой размерности каждый простой процесс предлагается рассматривать как отдельный «функциональный объект» (ФО) – *модельный образ материального объекта, которому прописывается некоторая ролевая сущность – функция* [8]. Сложный процесс управления полетом АКА разделяется на простые ФО, каждый из которых может быть подвергнут независимому моделированию. При этом создаваемый единый полимодельный комплекс при его практической реализации предлагается рассредоточить по различным местам разработки и испытания материальных объектов и их регуляторов. Это позволит распределять средства и методы комплексного моделирования, привлекая широкое сообщество экспертов самой высокой квалификации, каждый из которых может сам наблюдать за всеми аспектами поведения регулятора процесса для разработки сценариев «ситуация → решение». Самая высокая страта функциональной модели БП, реализуемой на средствах центра управления полетом (ЦУП) АКА, позволит руководителю полета наблюдать за обозримым числом состояний всего сложного процесса. Моделирование функционального объекта наиболее высокого уровня обеспечивается за счет моделирования функциональных слоев на стратах метамодели и рассмотренного координирующего инвестиционного механизма интеграции моделей. Таким образом, суперсложная модель поведения АКА наблюдается и воспринимается одним субъектом управления как «относительно простая». Аналогичным образом воспринимаются моделируемые «простые» процессы на стратах более низкого уровня.

Метамодель в полимодельном комплексе позволяет учитывать все эмерджентные свойства регуляторов процессов с учетом синергетических явлений в моделируемых ФО. Для этого используется механизм бинарных отношений между факторами, влияющими на протекание процессов в каждом ФО, которые передаются в виде исходных данных, включающих обнаруженные синергетические воздействия, для моделирования в соответствии с текущими ситуациями на борту АКА. Тем самым решается проблема сложности технической системы с гносеологической позиции за счет применения многомодельности с использованием для исследования результатов, полученных к настоящему времени в междисциплинароной отрасли системных знаний, которые конкретизируются в виде соответствующих методик и обеспечиваются материальными и вычислительными средствами в конкретных местах разработки и испытаний регуляторов процессов или в ЦУПе. Одновременно проблема сложности технической системы (структуры, функционирования, моделирования развития и др.) с онтологи-

ческой позиции решается за счет распределения целей и задач при моделировании ФО. Когнитивно-графическое визуальное представление сложного процесса управления полетом АКА предлагается осуществлять переводом модельного образа в компактное изображение для ускоренного понимания текущей ситуации (рис. 6). Характеристики каждого агрегата закодированы графическими способами, называемыми «категории кода» [19]. Устанавливается последовательность иерархической упорядоченности в виде размещения страт С1-С4. На каждой страте указаны покрытия множеств вершин взвешенных графов в виде диаграмм Эйлера – Венна с агрегированием в кластерные образования с двойным и одинарным пересечением процессов. Штатные процессы в одном агрегате могут быть внешними по отношению к процессам в смежном агрегате.

Разработанную когнитивную агрегативно-потоковую метамодель предлагается использовать для поиска компромиссных решений в существующей на борту аппарата противоречивой проблемной ситуации, вызванной, с одной стороны, неклонируемостью свойств отдельных элементов БС АКА, которые могут самоорганизовываться и саморазвиваться в полете под действием внешних и внутренних факторов, с другой стороны – необходимостью использования этих же неповторяемых индивидуальных текущих свойств элементов БС для ресурсного обеспечения полета АКА.

Выводы. Предложена новая методика построения агрегативно-потоковой метамодели сложного процесса управления полетом АКА в виде «динамической когнитивной карты». При этом параметры каждой модели в метамодели зависят от времени и бинарных отношений, построенных на множествах управляющих и возмущающих воздействий на бортовые материальные объекты через регуляторы процессов. Синергетические явления рассматриваются как дополнительный фактор в составе множества возмущающих воздействий. Планарность построения модели в виде «динамической когнитивной карты» сложного процесса управления полетом АКА на базе функциональных графов позволяет в интерпретации системно-кибернетического описания АКА как «ящика» перейти от модели «черного ящика» к модели «белого ящика». Прозрачность моделирования достигается за счет введения необходимого количества страт (в рассмотренном примере четырех) при планарном построении когнитивной карты. При этом выполняется то условие, что математическая, материальная или концептуальная модель процесса страты самого нижнего уровня описывает состояние регулятора как «белого ящика», при котором становится возможным явное описание изменения различных параметров исследуемого процесса во времени с помощью известного отображения области определения процесса в область его значений. Далее известность результатов отображения процессов на уровне всего АКА обеспечивается за счет комплексного моделирования процессов на уровнях страт с инвестированием результатов «прозрачности процессов» самого нижнего уровня до верхнего уровня «динамической когнитивной карты». Разработка когнитивной агрегативно-потоковой метамодели процесса управления полетом позволяет с конструктивных позиций подойти к решению проблем размерности и сложности самого комплексного моделирования АКА в ходе его управляемого полета.

Моделирование АКА как «белого ящика» позволяет выявлять эмерджентные свойства бортовых систем и их элементов с учетом синергетических явлений для

использования результатов исследования новых свойств БС АКА в целях рационального расходования бортовых ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ковтун В.С.* Постановка задачи вариабельного управления полетом автоматических космических аппаратов для рационального использования ресурсов бортовых систем // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 1 (94). – С. 13–23.
2. *Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В.* Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Т. 14. – № 4. – С. 17–37.
3. *Иванов В.А*. Функциональная устойчивость систем. Перспективы повышения их надежности // Космонавтика и ракетостроение. – 2000. – № 19. – С. 181–189.
4. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: Изд. РАН, 2018. – 312 с.
5. *Ковтун В.С.* Стратификация сложного процесса управления полетом космического аппарата // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 4. – С. 78–88.
6. *Ярмолик В.Н., Вашинко Ю.Г.* Физически неклонируемые функции // Информатика. – 2011. – № 2 (30). – С. 92–103.
7. *Ковтун В.С., Фролов И.В.* Методы вариабельного анализа и синтеза сложного процесса управления системой электроракетных двигателей космических аппаратов // Космическая техника и технологии. – 2016. – № 4 (15). – С. 47–67.
8. *Кириллов Н.П.* Концептуальная модель объекта ситуационного управления функциональным состоянием технических систем // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – № 4. – С. 61–75.
9. *Jeff A. Estefan*. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies // http://www.omgsysml.org/MBSE_Methodology_Survey_RevB.pdf.
10. *Микрин Е.А*. Бортовые комплексы управления космических аппаратов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 245 с.
11. *Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полётами. Ч. 1. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 477 с.
12. *Ковтун В.С.* Построение и исследование функционального графа процесса управления полетом автоматического космического аппарата // XLIV академические чтения по космонавтике «Королёвские чтения». – М., 2020. – 13 с.
13. *Горбатов В.А.* Фундаментальные основы дискретной математики. – М.: Наука. Физматлит, 1999. – 540 с.
14. *Синельникова О.И., Вечирская И.Д*. Представление многоместных отношений в виде композиции бинарных отношений // Радиоэлектроника и информатика. – 2001. – № 3. – С. 147–150.
15. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2005. – 291 с.
16. *Алешин Е.Н., Зиновьев С.В., Копкин Е.В., Осипенко С.А., Павлов А.Н., Соколов Б.В.* Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – 357 с.
17. *Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н.* Управление ориентацией космических аппаратов. – М.: Наука, 1974. – 594 с.
18. Патент RU 2356802 C2. МПК B64 G 1/00/ Платонов В.Н., Беляев М.Ю., Банит Ю.Р., Ковтун В.С. Способ поддержания трехосной ориентации космического аппарата с силовыми гироскопами и целевой нагрузкой // Изобретения. – 2009. – № 15.
19. *Бурдаев М.Н., Емельянова Ю.Г., Хачумов В.М.* Когнитивная машинная графика в системах космического и медицинского назначения. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 4 августа 2020 г.

COGNITIVE AGGREGATE-FLOW METAMODEL OF THE PROCESS AUTOMATIC SPACECRAFT FLIGHT CONTROL

V.S. Kovtun

S. p. Korolev rocket and space Corporation Energia (RSCE)
4A, Lenin st., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation

E-mail: Vladimir.S.Kovtun@rsce.ru

Abstract. *Currently, there is an urgent scientific problem of ensuring the effective implementation of the automatic spacecraft (AS) flight program, taking into account the material, energy and information resource limitations of onboard systems (OS). The consumption of OS resources largely depends on the synergistic phenomena that occur during intersystem interaction in the AS. By using these phenomena, it is possible to increase the efficiency of the use of existing resources, as well as to supplement them with new "synergistic" resources [1,2]. At the same time, synergistic phenomena can lead to premature development of the OS resource and unforeseen (non-calculated) failures and accidents [3]. For purposeful search and use of these synergistic phenomena, it is necessary to conduct a special study of the processes occurring on board. Research becomes possible only when moving from the system-cybernetic model of AS as a " black box "to a system-cybernetic model that provides" transparency "of AS as a" white box", which requires high accuracy and complexity of analysis of processes occurring on board [4]. This situation determines the urgency of developing new engineering techniques and modeling technologies. To create them, it is necessary to solve the problem of the initial stage of building models that describe in one form or another the engineering knowledge of OS development experts and flight control specialists [5]. The development of a universal method for solving the problem of the initial stage of modeling is significantly complicated due to the wide variety of OS, each of which has its own emergent and synergistic properties, which largely depend on the "non-clonability" of their elements [6,7].*

In order to simplify the modeling of real OS functioning processes, taking into account their specifics, it is proposed to carry out preliminary development of a formalized cognitively structured aggregate-flow metamodel ("model of models") of the AS flight control process, which contains information about potentially existing capabilities for controlling the state of vehicles in various conditions of implementation of nominal and abnormal processes. Creating a conceptual metamodel allows you to make the transition from the subject formalized model to the next stages of modeling-formal-mathematical and material-functional modeling, which take into account the individual characteristics of the processes on board the AS when controlling its flight. At the same time, the problems of overcoming the complexity of the metamodel, including its dimension, are solved.

Keywords: *automatic spacecraft, model, cognitive map, synergetic phenomena, incident matrix, aggregate, functional graph.*

REFERENCES

1. *Kovtun V.S.* Statement of the problem of variable flight control of automatic spacecraft for rational use of resources of onboard systems // Cosmonautics and rocket science. 2017. No. 1 (94). Pp. 13–23.
2. *Akhmetov R.N., Makarov V. P., Sollogub A.V.* Bypass As an attribute of survivability of automatic spacecraft in abnormal flight situations // Bulletin of the Samara state aerospace University. 2015. Vol. 14, No. 4, Pp. 17–37.
3. *Ivanov V. A.* Functional stability of systems. Prospects for improving their reliability // Cosmonautics and rocket science. - 2000. No. 19. Pp. 181–189.
4. *Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Qualimetry of models and polymodel complexes, M., Publishing house of the Russian Academy of Sciences, 2018, 312 p.
5. *Kovtun V.S.* Stratification of the complex process of spacecraft flight control // Cosmonautics and rocket science. 2012. no. 4. Pp. 78–88.
6. *Yarmolik V.N., Vashinko Yu.G.* Physically unclonable functions // Informatics. 2011. No. 2 (30). Pp. 92–103.

Vladimir S. Kovtun (Ph.D. (Techn.)), Chief Specialist of System Engineering.

7. *Kovtun V.S., Frolov I.V.* Methods of variable analysis and synthesis of a complex process of controlling the system of electric rocket engines of spacecraft// Space engineering and technologies. 2016. No. 4 (15). C. 47–67.
8. *Kirillov N.P.* Conceptual model of the object of situational management of the functional state of technical systems // Artificial intelligence and decision-making #4. 2012. Pp. 61–75.
9. *Jeff A. Estefan.* Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies // http://www.omgsysml.org/MBSE_Methodology_Survey_RevB.pdf.
10. *Mikrin E.A.* On-Board control systems for spacecraft. Moscow: Bauman Moscow state technical University publishing house, 2014, 245 P.
11. *Solovyov V.A., Lysenko L.N., Lyubinsky V.E.* Space flight Control. Part 1. Moscow: Bauman Moscow state technical University. 2009. 477 P.
12. *Kovtun V.S.* Construction and research of the functional graph of the automatic spacecraft flight control process. XLIV academic readings on cosmonautics "Royal readings". M., 2020. 13 p.
13. *Gorbatov V.A.* Fundamental principles of discrete mathematics. Moscow: Nauka. Fizmatlit. 1999. 540 p.
14. *Sinel'nikova O.I., Vecherskaya I.D.* Representation of multiple relations as a composition of binary relations // Radio electronics and computer science. 2001. No. 3. Pp. 147–150.
15. *Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Intelligent technologies for monitoring the state and managing the structural dynamics of complex technical objects. 2005. 291 pp.
16. *Aleshin E.N., Zinoviev S.V., Kopkin E.V., Osipenko S.A., Pavlov A.N., Sokolov B.V.* System analysis of organizational and technical systems for space purposes: textbook. St. Petersburg: A.F. Mozhaisky VKA, 2018. 357 p.
17. *Raushenbach B.V., Tokar E.N.* Control of spacecraft orientation. – Moscow: Nauka, 1974. 594 p.
18. Patent RU 2356802 C2. MPK B64 G 1/00 / Platonov V.N., Belyaev M.Yu., Banit Yu.R., Kovtun V.S. Method for maintaining the three-axis orientation of a spacecraft with power gyroscopes and target load // Invention No. 15. 2009.
19. *Burdaev M.N., Emelyanov Y.G., Khachumov V.M.* Cognitive computer graphics systems for space and medical applications. M.:LENAND, 2019. 256 p.

doi: 10.14498/tech.2020.3.4

УДК 004.896

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМОЙ ИМИТАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК*

А.Д. Обухов, А.А. Сиухин

Тамбовский государственный технический университет
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106

E-mail: obuhov.art@gmail.com

Аннотация. *В данном исследовании рассматривается предметная область систем имитации физических нагрузок, реализуемых на основе управляемых беговых платформ. Время, потраченное системой управления на получение и обработку информации о состоянии пользователя и системы, вызывает программно-аппаратное запаздывание, которое препятствует своевременной реакции системы на естественное перемещение пользователя. Проблему запаздывания системы управления нельзя решить использованием прямых данных состояний человеко-машинной системы. Целью представленного исследования является разработка нового метода управления, позволяющего осуществить анализ состояния пользователя и платформы, прогнозирование его движений и организовать процесс управления системой имитации физических нагрузок. Метод реализуется с применением нейронных сетей. Научная новизна метода заключается в использовании нейронных сетей для решения задач прогнозирования действий пользователя и автоматизации принятия решений по управлению системой имитации физических нагрузок. Каждая представленная нейронная сеть сформирована для выполнения отдельных задач. Первая – для создания прогноза изменения состояний человеко-машинной системы. Вторая – для определения принадлежности спрогнозированного состояния какому-либо состоянию в исторических данных. Третья определяет требуемое изменение состояний параметров человеко-машинной системы для достижения спрогнозированного состояния. Возможности использования описанного подхода представлены на примере беговой дорожки, которая адаптируется к реальным параметрам передвижения пользователя. Полученные результаты подтверждают значительное снижение сложности реализации процесса управления после применения нейросетевого метода. Область применения нейросетевого метода управления – адаптивные информационные системы и системы автоматического управления, в которых необходимо минимизировать время запаздывания системы и реакции на действия пользователя.*

Ключевые слова: *нейросетевой метод управления, нейронные сети, адаптивные системы управления, имитация физических нагрузок.*

Введение

Для обеспечения полного погружения человека в виртуальное окружение при его подготовке на тренажерных, диагностических и развлекательных комплексах необходимо решить задачу качественного перемещения по виртуальному пространству. Использование контроллеров или жестов в данном случае является промежуточным, недостаточным и неполноценным решением. Поэтому активно развивается направление по созданию и интеграции систем имитации физических нагрузок для естественного взаимодействия с виртуальной реальностью. В основе таких систем – беговые дорожки, платформы или иные конструк-

**Работа выполнена в рамках гранта РФФИ (проекта № 19-07-00660).*

Обухов Артем Дмитриевич (к.т.н.), доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»
Сиухин Александр Андреевич, аспирант.

ционные решения, позволяющие пассивно или активно организовывать процесс перемещения.

Существует два принципиально различных подхода созданию платформ для перемещения человека по виртуальному пространству. Первый подход, позволяющий осуществить процесс перемещения человека в разных направлениях, реализован без использования систем управления. Такие платформы называются пассивными, в них используются скользящие поверхности, что не позволяет реализовать требуемую нагрузку на мышцы человека. Пассивные системы часто не содержат электроники и не требуют каких-либо систем управления, но в связи с отсутствием сил трения область их использования ограничена развлекательными платформами. Второй подход к созданию платформ реализован с использованием систем активного управления. Такие платформы называются активными. Примером активной платформы является беговая дорожка, скорость полотна которой рассчитывается системой управления автоматически, в зависимости от скорости перемещения пользователя. Помимо отслеживания направления и скорости перемещения человека такие платформы позволяют осуществлять создание реальных физических нагрузок, аналогичных свободному перемещению человека. В области создания тренажерных комплексов и подготовки кадров наибольший научный интерес представляют именно активные тренажерные платформы, способные создавать физическую нагрузку, аналогичную реальной возникающей при перемещении на большие расстояния; такие платформы называются имитаторами физических нагрузок [1, 2].

В рамках данного исследования рассматривается математическая модель системы управления имитатором физических нагрузок, разработанная с учетом анализа существующих подходов к организации процесса управления в системах подобного рода, а также предложен метод на основе нейронных сетей для автоматизации процессов управления. Применение методов машинного обучения позволило адаптировать скорость движения бегового полотна системы под индивидуальные особенности пользователей.

Анализ подходов к управлению системами имитации физических нагрузок

Во всех существующих имитаторах физических нагрузок присутствует проблема с запаздыванием реакции системы управления на действия пользователя. Например, при остановке пользователя полотно дорожки в течение нескольких секунд продолжать движение или сбрасывает скорость, что приводит к негативным последствиям для пользователей, таким как расстройство вестибулярного аппарата, укачивание, потеря равновесия, тошнота [3]. Все эти факторы негативно влияют на погружение человека в виртуальное пространство и препятствуют процессу подготовки [4–9].

Существующие алгоритмы управления, основанные на расчетах изменения скорости полотна в зависимости от скорости пользователей, не позволяют задать имитатору скорость пользователя, что вызвано наличием программно-аппаратного запаздывания сбора и обработки информации. Обычно подобные имитаторы реализуются на основе оценки текущего положения пользователя, его удаленности от некоторой нулевой точки и, соответственно, на регулировании скорости движения поверхности дорожки в зависимости от этого расстояния. Кроме запаздывания системы управления особое значение в механических системах имеет инертность, т. к. даже мгновенное отключение питания исполни-

тельных элементов аппаратной системы не позволит остановить беговое полотно [2, 4, 7–11].

Поэтому перспективным направлением является создание систем управления на основе нейронных сетей не только для анализа законов движения, но и для прогнозирования состояния пользователя или внешней среды (например, сил инерции) и управления компонентами адаптивной системы имитации (АСИ). Здесь можно выделить два основных варианта решения задачи [6–7, 14–16].

Первый вариант основан на использовании нейронных сетей для классификации действий пользователя [17–19]. Обозначим данный подход как частично нейросетевое управление, так как нейронные сети будут использоваться только для выбора режима функционирования системы. Для его реализации необходимо выполнить следующие действия:

1. Осуществить сбор данных UC о пользователе, системе и внешних объектах (обозначим их совокупность как множество характеристик информационных объектов).
2. Определить перечень возможных состояний US информационных объектов, а также состояний S системы управления.
3. Соотнести последовательности данных об информационных объектах с выполняемыми системой управления в данный момент действиями A.
4. Использовать полученные пары «набор координат – действие» в качестве исходных данных для обучения нейронной сети.
5. Осуществить обучение нейронной сети.
6. Разработать вторую нейронную сеть, которая на основе значений i-го набора формирует значения $(i+1)$-го набора [20]. Таким образом, возможно осуществить прогнозирование состояния информационных объектов и минимизировать влияния запаздывания процессов обработки и передачи данных системы управления.
7. Интегрировать нейронные сети в систему управления для прогнозирования и последующей классификации действий информационных объектов и выбора на основе полученных от нее результатов необходимых режимов функционирования или действий.

Так как режим определяется не на основе текущих данных, а с некоторым прогнозом, система реагирует на действия раньше, что приводит к сокращению негативных последствий и эффекта запаздывания. В качестве архитектуры рекомендуется использовать многослойную плотную либо рекуррентную сеть.

Второй вариант основан на использовании нейронных сетей для полноценного управления системой. Обозначим данный подход как полное нейросетевое управление [21]. Его реализация включает следующие этапы:

1. Осуществить сбор данных U о состояниях информационных объектов.
2. Осуществить сбор данных S о состоянии системы управления.
3. Реализовать функцию награды Q, зависящую от текущего состояния системы S. Данная функция стремится к $S(Q) \to 1$ при оптимальном состоянии системы (информационные объекты функционируют в соответствии с требованиями, все ограничения выполнены, метрики показывают допустимые значения) и к $S(Q) \to 0$ в остальных случаях (понижение значений метрик качества функционирования системы, неправильные параметры информационных объектов и так далее).

4. Сформировать набор действий A, которыми можно воздействовать на систему.

5. Обучить рекуррентную нейронную сеть, на вход которой поступает сочетание состояния системы S, состояния информационных объектов U и возможные действия A. Для каждого сочетания вычисляется функция Q. Для наиболее правильных действий Q будет стремиться к 1, а для остальных (неправильных) – к нулю.

6. Нейронная сеть может тренироваться на подготовленных или сгенерированных данных.

7. Обученная нейронная сеть интегрируется в систему управления.

В качестве целевой функции можно использовать максимальную сумму значений функций наград или максимальное время нахождения системы в оптимальном режиме функционирования. Согласно предложенному методу по текущему состоянию системы и действиям пользователя нейронная сеть подбирает действия, обеспечивающие максимальную награду и, следовательно, оптимальные в данной ситуации.

Второй подход выглядит более перспективным, однако отличается большей трудоемкостью и сложностью реализации, а также необходимостью длительного обучения и тщательного тестирования.

Формализация нейросетевого метода управления

Перед формализацией нейросетевого метода управления рассмотрим основные объекты в данной области.

Пусть задана математическая модель системы управления M:

$$M(U,S)=A, \tag{1}$$

где U – множество информационных объектов, включающее множество их характеристик UC и состояний US в моменты времени T:

$$U=\bigcup_{t_i\in T}\left\{UC\left(t_i\right)\times US\left(t_i\right)\right\}. \tag{2}$$

Для конкретного информационного объекта получим:

$$u_n=\left\{UC_n\left(t_i\right)\times US_n\left(t_i\right)\,|\,u_n\in U, t_i\in T\right\}. \tag{3}$$

Каждому замеру соответствует V параметров $uc_{n,i,j}$, отражающих характеристики объекта в момент времени t_i:

$$UC_n\left(t_i\right)=\left\{uc_{n,i,j}\mid j=\overline{1..V}\right\}, UC_n\left(t_i\right)\in UC\left(t_i\right). \tag{4}$$

В каждый момент времени t_i информационный объект U имеет определенное и единственное состояние из множества всех возможных $US\left(t_i\right)\in\left\{us_1,us_2,...,us_m\right\}$:

$$US_n\left(t_i\right)=us_l, us_l\in US\left(t_i\right), \tag{5}$$

S – множество состояний системы управления, характеризующих параметры системы в момент времени t_i:

$$S = \{S_i(t_i) \mid t_i \in T\}; \tag{6}$$

A – реакция системы управления в ответ на изменение состояния системы и информационных объектов:

$$A = \{a_i \mid i = \overline{1..N}\}; \tag{7}$$

N – конечное число возможных изменений состояний системы.

Формализуем метод частичного нейросетевого управления.

Сформируем структуру нейронной сети NN_C, осуществляющей преобразование. В качестве входных данных о характеристиках объекта могут использоваться как только текущие значения

$$NN_C : UC_n(t_i) \to US_n(t_i), \tag{8}$$

так и некоторая их совокупность за определенный отрезок времени w, которая рассчитывается согласно

$$UC_n^h(t_i, w) = \left\{UC_n(t_{i-w}), UC_n\left(t_{i-(w-1)}\right), \ldots, UC_n(t_i)\right\}. \tag{9}$$

Использование в расчетах данных с промежутка времени (9) может быть предпочтительнее, так как позволяет выделить динамику действий пользователя. В общем виде тогда обозначим преобразование NN_C в следующей форме:

$$NN_C : UC_n^h(t_i, w) \to US_n(t_i) \mid w = \overline{1..H}, \tag{10}$$

где H – длина истории характеристик информационного объекта.

Для устранения эффекта запаздывания при принятии решений в системе управления необходимо не только оперировать текущими характеристиками объектов и их состояниями, но и прогнозировать предстоящие. Обозначим $UC_n^d(t_i, \tau)$ – прогноз характеристик объекта относительно момента времени t_i, которых достигнет объект UC_n через время $\tau \geq \theta$ (θ – запаздывание системы):

$$UC_n^d\left(t_i, \tau\right) = \left\{UC_n\left(t_i\right), UC_n\left(t_{i+1}\right), \ldots, UC_n\left(t_{i+\tau}\right) \mid \tau \geq \theta\right\}. \tag{11}$$

Для получения $UC_n^d(t_i, \tau)$ обучим нейронную сеть прогнозирования NN_F, принимающую на вход историю характеристик $UC_n^h(t_i, w)$ информационного объекта, а на выходе формирующую $UC_n^d(t_i, \tau)$:

$$NN_F : UC_n^h\left(t_i, w\right) \to UC_n^d\left(t_i, \tau\right). \tag{12}$$

Тогда для решения задачи частичного нейросетевого управления с учетом эффекта запаздывания θ системы на τ моментов времени необходимо сформулировать отображение:

$$NN_A : NN_C\left(NN_F\left(UC_n^h\left(t_i, w\right)\right)\right) \to A. \tag{13}$$

Таким образом, три нейронные сети работают последовательно:

– 1-я нейронная сеть осуществляет прогноз характеристик информационного объекта $NN_F\left(UC_n^h\left(t_i, w\right)\right) = UC_n^d\left(t_i, \tau\right)$;

– 2-я сопоставляет с характеристиками объекта его возможное состояние:

$$NN_C\left(UC_n^d\left(t_i,\tau\right)\right)=US_n\left(t_{i+\tau}\right);$$

– 3-я сопоставляет состояние объекта и необходимое действие в системе управления: $NN_A\left(US_n\left(t_{i+\tau}\right)\right)=a_i$.

Таким образом, решаются две обозначенные проблемы: минимизируется эффект запаздывания за счет обработки не только текущих данных, а данных исторических изменений состояний; формируется прогноз состояний системы; осуществляется управление системой на основе анализа изменений состояния информационных объектов в автоматическом режиме.

На этапе (13) возможны различные модификации: к состоянию информационных объектов могут быть добавлены их характеристики или параметры самой системы управления, текущий режим и так далее. Увеличение количества входных переменных позволит реализовать систему на основе нейросетевого управления более гибко.

Рассмотрим реализацию полного нейросетевого управления.

На первом этапе осуществим сбор данных о характеристиках $UC_n\left(t_i\right)$ и состоянии $US_n\left(t_i\right)$ информационного объекта.

На следующем этапе необходимо реализовать функцию наград; подход основан на использовании некоторых функциональных зависимостей или метрик, оценивающих характеристики или состояния объекта относительно их эталонного поведения:

$$Q=\begin{cases}1, \text{ если } \left|TU\left(u_n\left(t_i\right)\right)-TS\left(u_n\left(t_i\right)\right)\right|<\Delta T,\\ 0, \text{ если } \left|TU\left(u_n\left(t_i\right)\right)-TS\left(u_n\left(t_i\right)\right)\right|\geq\Delta T,\end{cases} \tag{14}$$

где $TU\left(u_n\left(t_i\right)\right)$ – эталонное поведение объекта u_i в момент времени t_i;

$TS\left(u_n\left(t_i\right)\right)$ – реальное поведение объекта u_i в момент времени t_i;

ΔT – допустимое отклонение поведения значений характеристик объектов (метрик).

Далее сформулируем набор действий A, которые может осуществлять система управления. Обучим на наборе собранных данных о взаимодействии информационных объектов с системой рекуррентную нейронную сеть, осуществляющую отображение:

$$NN_R:(S,U,A)\rightarrow Q. \tag{15}$$

Обучение осуществляется итерационно. Для каждого возможного набора S,U,A вычисляется значение функции Q. Затем обученная сеть используется для определения для текущих S и U оптимального действия $a_i\in A\,|\,i=\overline{1..N}$, при котором $Q\rightarrow\max$.

Представленный нейросетевой метод управления может использоваться в системах с большим количеством информационных объектов, законы функционирования которых не обозначены в явном виде.

Научная новизна предложенного подхода заключается в формализации и применении трех моделей нейронных сетей (классификации, прогнозирования и управления) с целью компенсации эффекта запаздывания в системах автоматического управления. В полном нейросетевом управлении используется механизм обучения функцией наград (Q-learning), что обеспечивает большую гибкость работы системы управления в условиях отсутствия известных законов функционирования информационных объектов.

Практическая реализация нейросетевого метода управления

Для апробации нейросетевого метода управления использовалась тестовая система управления по определению положения информационного объекта в одномерном пространстве (имитация перемещения человека по беговой дорожке с двумя направлениями). В данной системе необходимо корректировать скорость движения бегового полотна (пространства) в соответствии с положением объекта на нем.

Для системы выбраны следующие параметры:

– размеры пространства от -1 до 1;

– скорость движения пространства от -3 до 3;

– начальное положение объекта в 0.

На каждой итерации объект делает случайное перемещение в одном из направлений, что приводит к изменению его координаты. Пространство смещается в соответствии с этим сдвигом, возвращая объект в начальное положение. Замеры осуществляются дискретно через равные промежутки времени.

На первом этапе сформулирован эталон – набор исходных данных для обучения нейронной сети. В эталоне на каждом шаге проверяется положение объекта на пространстве, после чего скорость увеличивается (если объект в положительной половине пространства) либо уменьшается с шагом 1.

Для системы управления заданы действия по изменению скорости пространства. Всего задано 7 скоростей в диапазоне $[-3,3]$. Имеется возможность мгновенного переключения скорости; таким образом, количество возможных действий составляет 13 (изменения с шагом 1 от -6 до +6).

Классический подход заключается в реализации линейного закона управления – чем дальше объект удален от некоторой нулевой точки, тем выше скорость. Добавлено несколько ключевых положений для возможности свободного перемещения в определенной безопасной зоне. Скорость округляется до десятых, что в теории обеспечивает высокую плавность ее изменения.

Нейросетевой подход реализует частичное нейросетевое управление на основе трех нейронных сетей для анализа положения объекта, его прогнозирования и выбора текущего действия системы.

Первая нейронная сеть используется для прогнозирования движений объекта и устранения тем самым программной задержки. Вторая нейронная сеть используется для распознавания состояния объекта. Всего задано три состояния: ускоряется, сохраняет текущую скорость, замедляется. Третья нейронная сеть принимает решение о действии системы управления в текущих условиях.

Процесс обучения сетей осуществлялся на 100 000 записей и представлен на рис. 1. Таким образом, первая нейронная сеть показывает точность 98,5 %, вторая – 99,7 %, третья – 83,6 %. Данные результаты можно считать приемлемыми, так как даже для последней нейронной сети периодическая ошибка при выборе

между соседними действиями не будет иметь значительного эффекта (хотя и сказывается на значении точности).

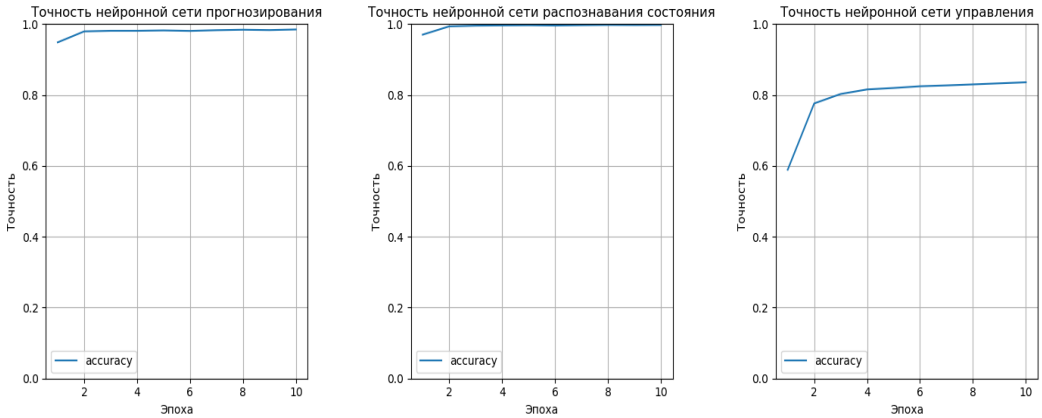


Рис. 1. Процесс обучения нейронных сетей

Далее проведен сравнительный эксперимент между эталоном, классическим и нейросетевым методами управления. На графике (рис. 2) представлено изменение положения объекта в пространстве с течением времени. Графики отражают значения координаты объекта в каждый момент времени при использовании всех трех вариантов управления.

Для оценки качества управления используем следующую метрику: просуммируем модули значений отклонения положения объекта от нулевой позиции и найдем их среднее арифметическое. Чем меньше данная величина, тем меньше колебался объект и тем больше он находился в одном положении несмотря на собственные перемещения. Тогда получим:

– для эталона: 0,203;

– для классического метода: 0,161;

– для нейросетевого метода: 0,115.

Значения данной метрики будем использовать в качестве точности в сводной таблице при сравнении методов.

Далее проведем анализ скорости пространства, выставляемой системой управления при различных методах (рис. 3). Здесь можно отметить точечные, незначительные колебания в классическом подходе, пропорциональные смещению объекта. Эталон показывает резкие скачки, необходимые для возврата объекта в допустимую область. Нейросетевой метод занимает промежуточное положение, кроме того постоянно осуществляя корректировку скорости. Предполагается, что колебания нейросетевого метода можно снизить за счет уменьшения шага регулировки скорости (сейчас составляет 1 против 0,1 у классического подхода). Однако такой шаг приведет к увеличению количества возможных действий, что может негативно сказаться на точности нейросетевого управления.

Сравнение сложности реализации нейросетевого метода управления относительно классической реализации представлено в таблице, а полученный положительный эффект от применения нейросетевого метода – на рис. 4.

Использовались следующие критерии: P – точность, CC – цикломатическая сложность (общая и усредненная), HAL – метрики Холстеда (сложности и времени), J – метрика Джилба.

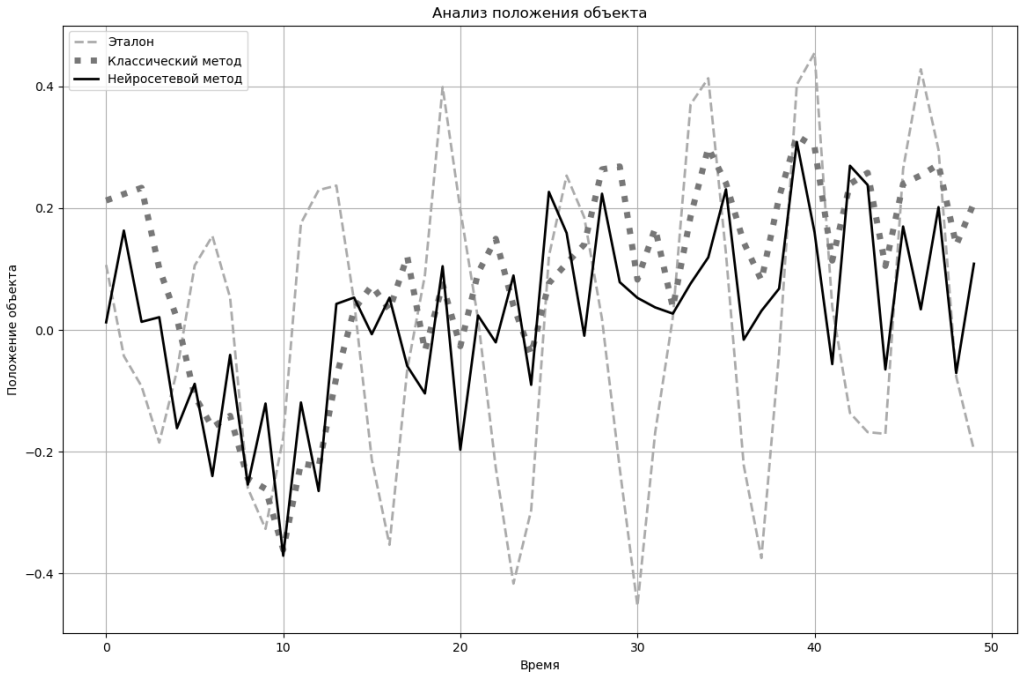


Рис. 2. Положение объекта при различных методах управления

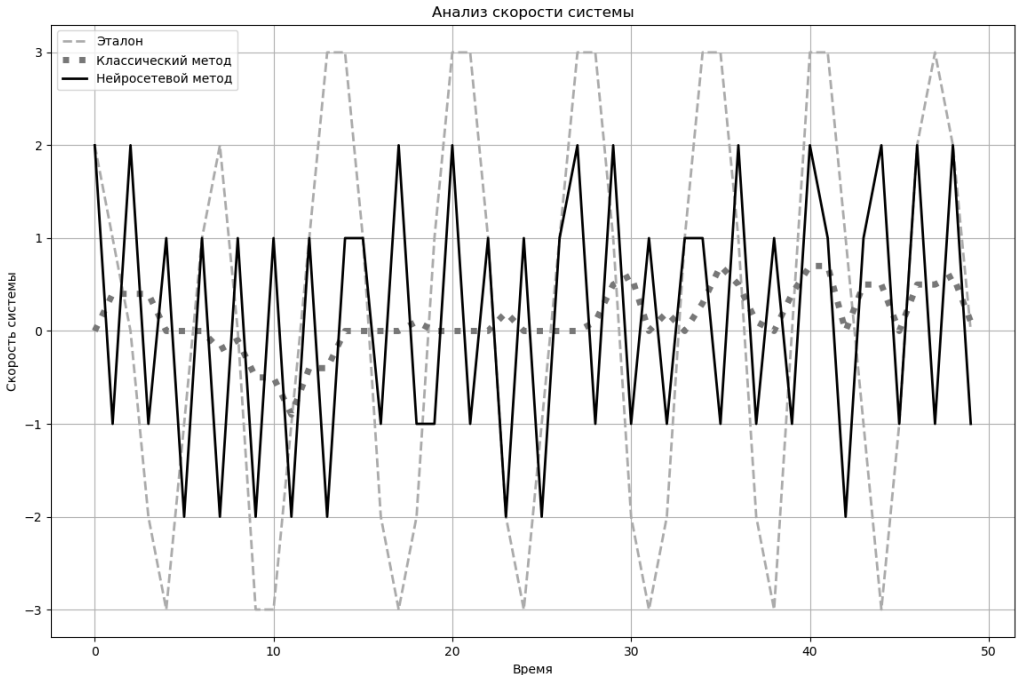


Рис. 3. Скорость пространства в системе при различных методах управления

Сравнение классического и нейросетевого метода управления

Критерий	Классический метод	Нейросетевой метод
P	0,129	0,096
CC	Sum (CC) = 36 Average (CC) = C (12)	Sum (CC) = 3 Average (CC) = A (3.0)
HAL	difficulty: 10.43 effort: 8755 time: 486	difficulty: 1.8 effort: 210 time: 11.6
J	0.42	0.13

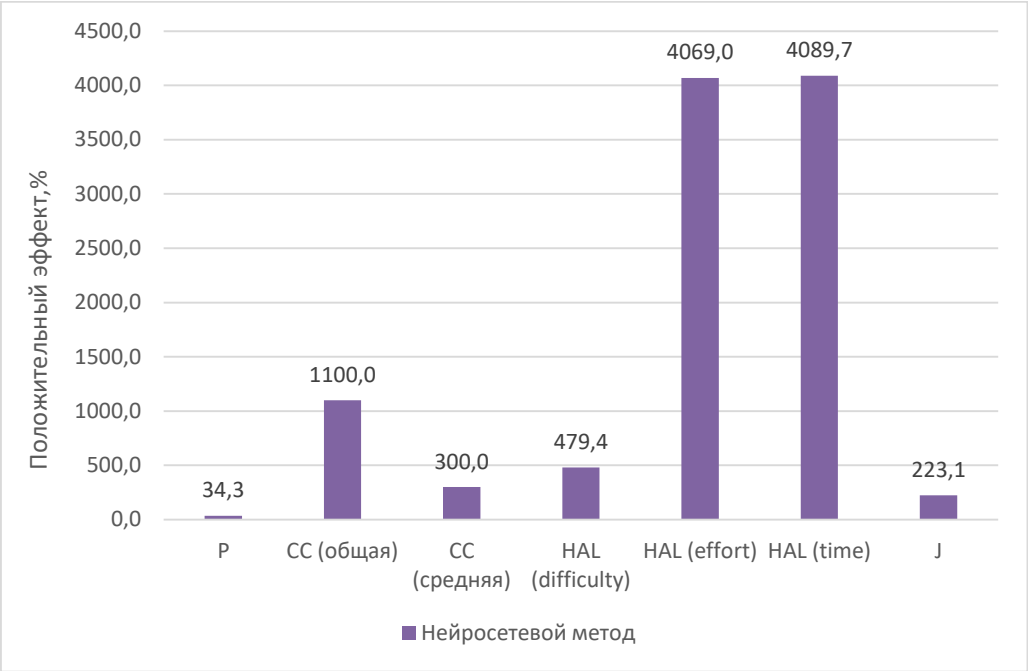


Рис. 4. Положительный эффект от применения нейросетевого метода относительно классического при реализации процесса управления

Полученные результаты подтверждают значительное снижение сложности реализации процесса управления после применения нейросетевого метода. Это обусловлено тем, что нет необходимости анализа и разработки информационных алгоритмов, учитывающих все возможные состояния объектов и системы. Нейронные сети самостоятельно аппроксимируют эти зависимости и закономерности, ускоряя процесс разработки. Кроме того, в ряде случаев такой подход приводит к повышению точности работы системы управления за счет более гибкого подхода и возможности прогнозировать состояния системы и объектов.

Таким образом, нейросетевое управление также доказало свою эффективность и перспективность при решении задач управления в АСИ, особенно для тех систем, где затруднена формализация законов функционирования объектов.

Заключение

Представленный в статье нейросетевой метод управления, основанный на использовании нейронных сетей для анализа прогнозирования и принятия решений, позволяет работать с большим количеством физических объектов, а также прогнозировать действия и положения различных объектов, законы движения которых явно не указаны.

Возможности использования описанного подхода представлены на примере беговой дорожки, которая адаптируется к реальным параметрам передвижения пользователя. Такой подход позволяет системе своевременно реагировать на изменения в поведении пользователя. Научная новизна предложенного подхода заключается в формализации и применении трех моделей нейронных сетей (классификации, прогнозирования и управления) с целью компенсации эффекта запаздывания в системах управления.

Область применения нейросетевого метода управления – адаптивные информационные системы и системы автоматического управления, в которых необходимо минимизировать время запаздывания системы и реакции на действия пользователя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Krasnyanskiy M.N., Obukhov A.D., Siukhin A.A., Dedov D.L.* Modeling of the learning process in adaptive training complexes // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Vol. 16. No. 4. Pp. 487-493.
2. *Iwata H.* Walking about virtual environments on an infinite floor // in Proceedings IEEE Virtual Reality. 1999. Pp. 286-293.
3. *Souman J. L., Giordano P. R., Schwaiger M., Frissen I., Thümmel T., Ulbrich H.* CyberWalk: Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). 2008. Vol. 8. No. 4. Pp. 1-22.
4. *Iwata H., Fujii T.* Virtual perambulator: a novel interface device for locomotion in virtual environment // in Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium. 1996. Pp. 60-65.
5. *Hsieh H.J., Lin H.C., Lu H.L., Chen T.Y., Lu T.W.* Calibration of an instrumented treadmill using a precision-controlled device with artificial neural network-based error corrections // Gait and posture. 2016. No. 45. Pp. 217-223.
6. *Aminian K., Robert P., Jequier E., Schutz Y.* Estimation of speed and incline of walking using neural network // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1995. Vol. 44. No. 3. Pp. 743-746.
7. *Bergmeir C., Sáinz G., Bertrand C.M., Benítez J.M.* A study on the use of machine learning methods for incidence prediction in high-speed train tracks // in International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems. 2013. Pp. 674-683.
8. *Comerford M., Mottram S.* Kinetic control-e-book: The management of uncontrolled movement // Elsevier Health Sciences. 2012.
9. *Schwaiger M.C., Thummel T., Ulbrich H.* A 2d-motion platform: The cybercarpet // in Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. 2007. Pp. 415-420.
10. *Frissen I., Campos J.L., Sreenivasa M., Ernst M.O.* Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments: an overview of the CyberWalk project // Human walking in virtual environments. 2013. Pp. 113-144.
11. *Fung J., Richards C.L., Malouin F., McFadyen B.J., Lamontagne A.* A treadmill and motion coupled virtual reality system for gait training post-stroke // CyberPsychology & behavior. 2006. Vol. 9. No. 2. Pp. 157-162, 2006.
12. *Minetti A.E., Boldrini L., Brusamolin L., Zamparo P., McKee T.* A feedback-controlled treadmill (treadmill-on-demand) and the spontaneous speed of walking and running in humans // Journal of Applied Physiology. 2003. Vol. 95. No. 2. Pp. 838-843.
13. *De Luca A., Mattone R., Giordano P. R., Ulbrich H., Schwaiger M., Van den Bergh M.* Motion control of the cybercarpet platform // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2012. Vol. 21. No. 2. Pp. 410-427.

14. *Selmic R.R., Lewis F.L.* Deadzone compensation in motion control systems using neural networks // IEEE Transactions on Automatic Control. 2000. Vol. 45, No. 4. Pp. 602-613.
15. *Hedjazi N., Benali A., Bouzit M., Dibi Z.* An omnidirectional platform design: application to posture analysis // in XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016. 2016. Pp. 602-607.
16. *Riener R., Lunenburger L., Jezernik S., Anderschitz M., Colombo G., Dietz V.* Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results // IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering. 2005. Vol. 13. No. 3. Pp. 380-394.
17. *Obukhov A.D., Sidorchuk A.O., Arkhipov A.A.* Algorithm for Data Collection and Processing about Learning Process on Training Complexes // In 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. Pp. 1-5.
18. *Pires dos Santos R., Dean D. L., Weaver J.M., Hovanski Y.* Identifying the relative importance of predictive variables in artificial neural networks based on data produced through a discrete event simulation of a manufacturing environment // International Journal of Modelling and Simulation. 2019. Vol. 39. No. 4. Pp. 234-245.
19. *Butepage J., Black M.J., Kragic D., Kjellstrom H.* Deep representation learning for human motion prediction and classification // In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. Pp. 6158-6166.
20. *Saleh K., Hossny M., Nahavandi S.* Intent prediction of pedestrians via motion trajectories using stacked recurrent neural networks // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2018. Vol.3, No. 4. Pp. 414-424.
21. *Obukhov A.D., Krasnyansky M.N.* Neural network architecture of information systems // Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki. 2019. Vol. 29. No. 3. Pp. 438-455.

Статья поступила в редакцию 14 июля 2020 г.

NEURAL NETWORK METHOD OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF IMITATION OF PHYSICAL FORCES

A.D. Obukhov, A.A. Siukhin

Tambov State Technical University
106, Soviet st., Tambov, 392000, Russian Federation

E-mail: obuhov.art@gmail.com

Abstract. *This research examines the subject area of physical forces simulation systems, implemented on the basis of controlled running platforms. The time spent by the control system to receive and process information about the state of the user and the system causes a software and hardware delay that prevents the system from responding in a timely manner to the user's natural movement. The control system delay problem cannot be solved using direct data of the states of the man-machine system. The aim of the presented research is to develop a new control method that allows analyzing the state of the user and the platform, forecasting his movements and organizing the process of managing the system for simulating physical forces. The method is implemented using neural networks. The scientific novelty of the method includes in the use of neural networks to solve the problems of forecasting user actions and automating decision-making to control the system for simulating physical forces. Each presented neural network is formed to perform separate tasks. The first is to create a forecast of changes in the states of a man-machine system. The second is to determine whether the forecasted state belongs to any state in the historical da-*

Artem D. Obukhov (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Automated decision support systems.

Alexander A. Siukhin, Postgraduate Student.

ta. The third determines the required change in the states of the parameters of the man-machine system to achieve the forecasted state. The possibilities of using the described approach are presented on the example of a treadmill that adapts to the real parameters of the user's locomotion. The results obtained confirm a significant reduction in the complexity of the implementation of the control process after applying the neural network method. The area of application of the neural network control method is adaptive information systems and automatic control systems, in which it is necessary to minimize the system delay time and response to user locomotion.

Keywords: *neural network control method, neural networks, adaptive control systems, imitation of physical forces.*

REFERENSES

1. *Krasnyanskiy M.N., Obukhov A.D., Siukhin A.A., Dedov D.L.* Modeling of the learning process in adaptive training complexes // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Vol. 16. No. 4. Pp. 487-493.
2. *Iwata H.* Walking about virtual environments on an infinite floor // in Proceedings IEEE Virtual Reality. 1999. Pp. 286-293.
3. *Souman J. L., Giordano P. R., Schwaiger M., Frissen I., Thümmel T., Ulbrich H.* CyberWalk: Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). 2008. Vol. 8. No. 4. Pp. 1-22.
4. *Iwata H., Fujii T.* Virtual perambulator: a novel interface device for locomotion in virtual environment // in Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium. 1996. Pp. 60-65.
5. *Hsieh H.J., Lin H.C., Lu H.L., Chen T.Y., Lu T.W.* Calibration of an instrumented treadmill using a precision-controlled device with artificial neural network-based error corrections // Gait and posture. 2016. No. 45. Pp. 217-223.
6. *Aminian K., Robert P., Jequier E., Schutz Y.* Estimation of speed and incline of walking using neural network // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1995. Vol. 44. No. 3. Pp. 743-746.
7. *Bergmeir C., Sáinz G., Bertrand C.M., Benítez J.M.* A study on the use of machine learning methods for incidence prediction in high-speed train tracks // in International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems. 2013. Pp. 674-683.
8. *Comerford M., Mottram S.* Kinetic control-e-book: The management of uncontrolled movement // Elsevier Health Sciences. 2012.
9. *Schwaiger M.C., Thummel T., Ulbrich H.* A 2d-motion platform: The cybercarpet // in Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. 2007. Pp. 415-420.
10. *Frissen I., Campos J.L., Sreenivasa M., Ernst M.O.* Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments: an overview of the CyberWalk project // Human walking in virtual environments. 2013. Pp. 113-144.
11. *Fung J., Richards C.L., Malouin F., McFadyen B.J., Lamontagne A.* A treadmill and motion coupled virtual reality system for gait training post-stroke // CyberPsychology & behavior. 2006. Vol. 9. No. 2. Pp. 157-162, 2006.
12. *Minetti A.E., Boldrini L., Brusamolin L., Zamparo P., McKee T.* A feedback-controlled treadmill (treadmill-on-demand) and the spontaneous speed of walking and running in humans // Journal of Applied Physiology. 2003. Vol. 95. No. 2. Pp. 838-843.
13. *De Luca A., Mattone R., Giordano P. R., Ulbrich H., Schwaiger M., Van den Bergh M.* Motion control of the cybercarpet platform // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2012. Vol. 21. No. 2. Pp. 410-427.
14. *Selmic R.R., Lewis F.L.* Deadzone compensation in motion control systems using neural networks // IEEE Transactions on Automatic Control. 2000. Vol. 45, No. 4. Pp. 602-613.
15. *Hedjazi N., Benali A., Bouzit M., Dibi Z.* An omnidirectional platform design: application to posture analysis // in XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016. 2016. Pp. 602-607.
16. *Riener R., Lunenburger L., Jezernik S., Anderschitz M., Colombo G., Dietz V.* Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results // IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering. 2005. Vol. 13. No. 3. Pp. 380-394.

17. *Obukhov A.D., Sidorchuk A.O., Arkhipov A.A.* Algorithm for Data Collection and Processing about Learning Process on Training Complexes // In 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. Pp. 1-5.
18. *Pires dos Santos R., Dean D. L., Weaver J.M., Hovanski Y.* Identifying the relative importance of predictive variables in artificial neural networks based on data produced through a discrete event simulation of a manufacturing environment // International Journal of Modelling and Simulation. 2019. Vol. 39. No. 4. Pp. 234-245.
19. *Butepage J., Black M.J., Kragic D., Kjellstrom H.* Deep representation learning for human motion prediction and classification // In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. Pp. 6158-6166.
20. *Saleh K., Hossny M., Nahavandi S.* Intent prediction of pedestrians via motion trajectories using stacked recurrent neural networks // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2018. Vol.3, No. 4. Pp. 414-424.
21. *Obukhov A.D., Krasnyansky M.N.* Neural network architecture of information systems // Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki. 2019. Vol. 29. No. 3. Pp. 438-455.

doi: 10.14498/tech.2020.3.5

УДК 621.3911:621.395

MODELS OF GROUP POISSON FLOWS IN TELECOMMUNICATION TRAFFIC CONTROL

B.Ya. Likhttsinder, Yu.O. Bakay

Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatic,
23, L. Tolstoy st., Samara, 443010, Russian Federation

E-mail: lixt@psuti.ru

Abstract. *The lack of effectiveness of the use of models of self-similar processes to the analysis of queues telecommunications systems is presented. The evolution of the flow models managed by Markov's chain is considered. The specifics of the use of Markov's flows as models of telecommunications traffic systems are considered. Models of single-channel queueing systems with input flows that have an arbitrary correlation are presented. Generalizations of the Khinchin-Pollaczek formula are given for these systems. The perspective of the application of interval methods developed by the author for queue analysis in queueing systems with correlated input flows is shown. It is suggested to use the group Poisson extraordinary flow as a model of telecommunication traffic. Interval characteristics of the given flows are reviewed and the prospects of their application are shown. The issues of multiplexing these flows during processing in queueing systems are considered. It is demonstrated that the resulting flow is also a group Poisson flow when summing up several group Poisson flows. The conclusions are confirmed by the simulation modeling results. The examples show the validity of such models to the characteristics of real video traffic flows.*

Keywords: *queueing systems, group models, queues, video traffic, correlations, Khinchin-Pollaczek formula.*

Introduction

The emergence of data networks with packet commutation showed that Poisson flow models were not adequate and the development of new models based on non-Poisson distributions is required. Flows with Weibull, Erlang, Pareto, gamma distributions, etc. are investigated. All-time intervals represented by these probability distributions were still considered to be mutually independent. This enabled the use of a well-designed queue theory apparatus for analyzing packet-switched networks. Description of complex correlated flows in modern telecommunications networks was often performed using "fractal" processes. Hundreds of works are devoted to the analysis of "self-similar" traffic. However, these studies did not bring significant practical results.

Insufficient efficiency of traffic representation by " self-similar" process models led to the creation of an entire class of thread models controlled by the Markov chain. The development stages of the above models are presented in the review [1]. In Russia, they were called MS-streams, while in the USA they evolved from "versatile" threads through "N-threads" (Nyuts flows) [2] to Markovian input threads (MAR - Markovian Arrival Process) and their generalization - Markov group input threads (BMAR - Batch Markovian Arrival Process) [6-13].

Boris Ya. Likhttsinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yulia O. Bakai, Student.

The impetus for the development of BMAR-models was their matrix representations, proposed in the works of M. Nyuts. The transition to the matrix representations of the probability characteristics of BMAP flows made it possible to describe their work and opened a wide scope for analytical research. However, the determination of the input stream characteristics was often done separately from the characteristics of its processing system. At the same time, such a characteristic as the time of batch processing in telecommunications systems depends not only on the system capacity but also is closely related to the size of the batch, which is one of the characteristics of the input flow. The most significant work in the field queueing systems analysis with such flows can probably be considered [3]. In our point of view, one of the promising directions of studying batch traffic is the interval method that we are developing [4], allowing us to replace the analysis of time intervals between neighboring requests and time intervals of processing requests with the analysis of one random value - the number of requests received during successive time intervals of processing each of the requests. It is demonstrated that the dispersion and correlation properties of the specified random value, at a specified load, fully describe the average queue size in queueing systems [4]. For single-channel SMOs, a ratio was obtained (1) that generalizes the known Khinchin-Pollaczek formula for the average queue value and is fair for any stationary application flows at a given load factor ρ :

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_m(\rho) + 2Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)]}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2} = \frac{mE(\rho)}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2}. \tag{1}$$

The analysis of the numerator $mE(\rho)$ of formula (1) shows that the average queue value for flows of any kind depends on two components: the first component is a dispersion $D_m(\rho)$ of the number of requests (packets) $m_i(\rho)$ received during the processing time interval of one request, and the second is a component due to the presence of correlation relations in the specified flow. Correlation relationships are taken into account by the covariance $Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)]$ between values $m_i(\rho)$ and queue values $q_{i-1}(\rho)$ in the previous analysis interval.

In a particular case, for Poisson flow, the specified component is equal to zero, and the variance is equal to $D_m(\rho) = \rho$. The generalized formula (1) then becomes ordinary when the service time is constant:

$$\overline{q(\rho)} = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}. \tag{2}$$

Group Poisson extraordinary flow

One of the varieties of BMAR flows is an extraordinary Poisson flow of events. In such a flow, the stationarity property is executed and no consequence is produced, but the ordinariness property is not performed. Let us take a look at the Poisson flow of independent events with the parameter λ . Each event consists of a simultaneous appearance at the moment t_k of a "batch" of μ_k independent randomly distributed numbers of applications, with the distribution $P|\mu_k = k| = f_k$. Such a flow is called a Poisson extraordinary (group) flow of independent events and is considered in [5].

Assume that τ is a time interval for processing one application. We divide a sufficiently large interval of time *T*, during which the flow of the specified events is active, by N_τ of such successive intervals. We suppose that $m_i(\tau)$ is the number of events that

occurred during the i-th time interval τ. Then the probabilities of occurrence of exactly n events in the interval are subject to the Poisson law:

$$P\left|m_i(\tau)=n\right|=P_n(\lambda\tau)=\frac{(\lambda\tau)^n}{n!}e^{-\lambda\tau}.$$

Each of the events is accompanied by the appearance of a "batch" with the distribution of probabilities of the number of requests f_k. Let us introduce the producing function $f(z)=\sum_{k=0}^{\infty} f_k z^k$. All μ_k are mutually independent and equally distributed. This means that the appearance of exactly $m_i(\tau)$ requests on the interval τ corresponds to probability $(f_k)^n$ and the producing function $[f(z)]^n$, provided that n events occurred on the specified interval.

The function producing the $G_{m(\tau)}(z)$ number of requests on the interval τ is:

$$G_{m(\tau)}(z)=\sum_{n=0}^{\infty} P_n(\lambda\tau)\cdot[f(z)]^n=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(\lambda\tau)^n}{n!}e^{-\lambda\tau}\cdot[f(z)]^n=$$
$$=[\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(\lambda\tau f(z))^n}{n!}e^{-\lambda\tau f(z)}]\cdot e^{\lambda\tau[f(z)-1]}=e^{\lambda\tau[f(z)-1]}.$$

Determine the average number of requests for τ:

$$\overline{m(\tau)}=\sum_{i=0}^{\infty} m_i(\tau)P_1[m_i(\tau)]=\left.\frac{\partial G_{m(\tau)}(z)}{\partial z}\right|_{z=1}=$$
$$\lambda\tau f^1(z)e^{\lambda\tau[f(z)-1]}\Big|_{z=1}=\lambda\tau f^1(1)$$

Considering that

$$f^1(1)=\frac{d}{dz}\sum_{k=0}^{\infty} f_k z^k\Big|_{z=1}=\sum_{k=0}^{\infty} k f_k=\bar{k},$$

We get: $\overline{m(\tau)}=\lambda\tau\bar{k}$, where $\bar{k}$ – the average number of requests in the "batch". Defining the second starting point:

$$\overline{m(\tau)^2}=\sum_{i=0}^{\infty} m_i^2(\tau)P_2[m_i(\tau)]=\left.\frac{\partial^2 G_{m(\tau)}(z)}{\partial z^2}\right|_{z=1}=\lambda\tau f^1(z)e^{\lambda\tau[f(z)-1]}\Big|_{z=1}=$$
$$=[\lambda\tau f^{11}(z)+(\lambda\tau f^1(z))^2]e^{\lambda\tau[f(z)-1]}\Big|_{z=1}=\lambda\tau\overline{k^2}+(\lambda\tau\bar{k})^2=\lambda\tau\overline{k^2}+\overline{m(\tau)}^2.$$

Determining the dispersion of $D_m(\tau)$ number of requests at intervals τ:

$$D_m(\tau)=\overline{m(\tau)^2}-\overline{m(\tau)}^2=\lambda\tau\overline{k^2}=\lambda\tau(D_k+\bar{k}^2)=\rho\bar{k}(1+\nu_k^2), \qquad (3)$$

where $\rho=\lambda\tau\bar{k}=\overline{m(\tau)}$ – total load factor; $\nu_k^2=\frac{D_k}{(\bar{k})^2}$ – a square of the coefficient of variation of requests numbers in batches. Dispersion $D_m(\rho)$ linearly depends on the load factor ρ. Let us convert formula (1):

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_m(\rho)\cdot J(\rho)}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2}, \tag{4}$$

where $J(\rho) = 1 + 2r_{q_{i-1}m_i}(\rho)$ – is called a covariance dispersion index and $r_{q_{i-1}m_i}(\rho) = \frac{Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)]}{D_m(\rho)}$ – is called normalized covariance function.

Further on with the help of simulation modeling, we show that at low load factors, the value of dispersion index for flows, with the Poisson distribution of requests numbers in batches, differs few from one. There the correlation component is practically absent. At the same time, the formula (1) is simplified $mE(\rho) = D_m(\rho) = \rho E$ and

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_m(\rho)}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2} = \frac{\rho E}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2}.., \tag{5}$$

where $E = \bar{k}(1+\nu_k^2)$. Dispersion $D_m(\rho)$ in (5) is linearly dependent on the load factor ρ, and its value is proportional to the average number of requests in a batch.

Allow us to consider private cases.

1. Ordinary Poisson flow: $k_i = 1, \bar{k} = 1,\ \nu_k^2 = 0,\ E = 1$ – In this case, the formula (2) is valid.

2. All batches have the same number of requests: $\bar{k} = k,\ \nu_k^2 = 0,\ E = k$.

3. The numbers of requests in batches are distributed according to Poisson law: $\bar{k} = k,\ \nu_k^2 = \frac{1}{k},\ E = \bar{k} + 1$.

4. The numbers of requests in batches are integer and are distributed by exponential law: $\bar{k} = k,\ \nu_k^2 = 1,\ E = 2\bar{k}$.

Group extraordinary Poisson flows with dependent number of requests in the batch

We have analyzed group Poisson flows in which random, mutually independent numbers of requests μ_k in batches also do not depend on time intervals between neighboring events (neighboring batches). Now let us take a look at the flow in which the specified numbers of requests in batches are proportional to the lengths of time intervals $\vartheta_k = t_{k+1} - t_k$ between the neighboring batches $\mu_k = \bar{k}\lambda\vartheta_k$. It is obvious that $\overline{\mu_k} = \bar{k}$. Since intervals ϑ_k between neighboring batches are mutually independent and have an exponential distribution, the numbers of requests μ_k in batches are also mutually independent and have an exponential distribution with an average value of $\bar{k}$, parameters $\nu_k^2 = 1$ and $E = 2\bar{k}$.

Unlike the above example, the number of requests in each of the batches is proportional to the lengths of the corresponding intervals ϑ_k, and the queue that occurs with the appearance of each of the batches has time to end before the next batch of requests arrives, even at a load factor equal to one.

Let us demonstrate it, taking into account that $\mu_k\tau = \bar{k}\lambda\tau\vartheta_k = \rho\vartheta_k$ is the processing time of all requests on the interval ϑ_k. Using $\Delta_k = \vartheta_k - \rho\vartheta_k = \vartheta_k(1-\rho)$, let us

define the stock by the processing time of all requests at a specified interval. The relative time stock $\frac{\Delta_k}{\vartheta_k} = 1 - \rho$ remains constant at all intervals and depends only on the load factor. At maximum load $\rho = 1$, the stock is equal to zero, but the processing of all the requests in the queue has time to complete before the next batch of requests appears (this is well illustrated by figures 7-8 in the section with simulation results).

Even in the case of maximum load, when in the interval preceding the interval of a batch, the last request is processed, the queue of requests $q_{i-1}(\rho) = 0$, and, consequently: $\overline{q_{i-1}(\rho) m_i(\rho)} = 0$. Considering that $Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)] = \overline{q_{i-1}(\rho)[m_i(\rho) - \rho]}$, we transform formula (1):

$$\overline{q(\rho)}(1-\rho) = \frac{D_m(\rho)}{2} + Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)] - \frac{\rho(1-\rho)}{2} = \frac{D_m(\rho)}{2} + \overline{q_{i-1}(\rho) m_i(\rho)} - \overline{q(\rho)}\rho - \frac{\rho(1-\rho)}{2}.$$

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_m(\rho)}{2} - \frac{\rho(1-\rho)}{2} = \frac{E\rho - \rho(1-\rho)}{2}.$$

$$\overline{q(\rho)} = \bar{k}\rho - \frac{\rho(1-\rho)}{2}. \tag{6}$$

The maximum value of a fraction in the obtained expression does not exceed 0.125. Even with small values of the number of requests in batches, the characteristic $\overline{q(\rho)}$ is almost linear, as shown in Figure 9 in the simulation section.

Equality to zero of the mathematical expectation $\overline{q_{i-1}(\rho) m_i(\rho)} = 0$ indicates that for this flow, the mutual covariance $Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)]$ is not equal to zero. It is negative:

$$Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)] = \overline{q_{i-1}(\rho) m_i(\rho)} - \overline{q(\rho)}\rho = -\overline{q(\rho)}\rho.$$

By substituting $\overline{q(\rho)}$ values from (6), we obtain:

$$Cov[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)] = -\bar{k}\rho^2 + \frac{\rho^2(1-\rho)}{2} = -\bar{k}\rho^2\left(1 - \frac{1-\rho}{2\bar{k}}\right) \tag{7}$$

The covariance has almost a quadratic dependence on the load factor at sufficiently large values of numbers of requests in batches.

The ratio (7) allows us to determine the numerator values in the first fraction (1), which we identified in the simulation section in Figure 9 - through $mE(\rho)$.

$$mE(\rho) = 2\bar{k}\rho(1-\rho)\left(1 + \frac{\rho}{2\bar{k}}\right). \tag{8}$$

The specified dependence has a maximum at values of $\rho \approx 0{,}5$ - see Fig. 9. The member N decreases when substituted in formula (1). It is the presence of the member $(1-\rho)$ that leads to the almost linear dependence of the average queue size on the load factor shown in (6) for this flow.

Group hyperpoisson flows

The sum of independent simultaneously running parallel flows considered above is called a group hyperpoisson flow. Unlike most of the flows controlled by the Markov chain, all the summed up flows run not sequentially but continuously and in parallel in time. When receiving a hyperpoisson flow there is a summing up of several Pois-

son events flows, each of which represents a batch of simultaneously incoming requests. However, the total flow of events (batches appearances) is a Poisson flow. Therefore, the total request flow is also a group Poisson flow.

The linear dependence of the numerator in the formula (5) on the load factor at small loads greatly simplifies the determination of average sizes of the queues of the total hyperpoisson flow when multiplexing mutually independent group Poisson flows:

$$\rho_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{M} \rho_j; \;\; E_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{M} \frac{\rho_j}{\rho_{\Sigma}} E_j \quad .$$

For average values of the generated queues, the resulting total hyperpoisson flow is equivalent to the corresponding group Poisson flow. However, the characteristics of their instantaneous values may differ significantly. Further on, we will show that an aggregate hyperpoisson flow with characteristics very close to the actual modeled flow can be obtained by an appropriate selection of characteristics of the summarized flows.

Simulation modeling

In this section, we confirm our conclusions with the results of simulation modeling using the software system developed by us [4]. The system allows us to obtain and study the main interval characteristics of flows presented in .txt format as a sequence of moments of receiving requests.

A group flow with the Poisson distribution of probabilities for independent numbers of requests in a batch. Two group Poisson flows with the same values of intensity $\lambda = 1$ per second were generated. The first flow contained batches of requests having a Poisson distribution of numbers of requests in a batch with the average value of $\overline{k_1} = 10$ requests in the batch and intensity of $\lambda_1 = 0{,}1$ batches per second. $\lambda = \overline{k_1}\lambda_1 = 1$ The second flow had the following characteristics:

$$\lambda = \lambda_2 = 1; \overline{k_2} = k_2 = 1 \; .$$

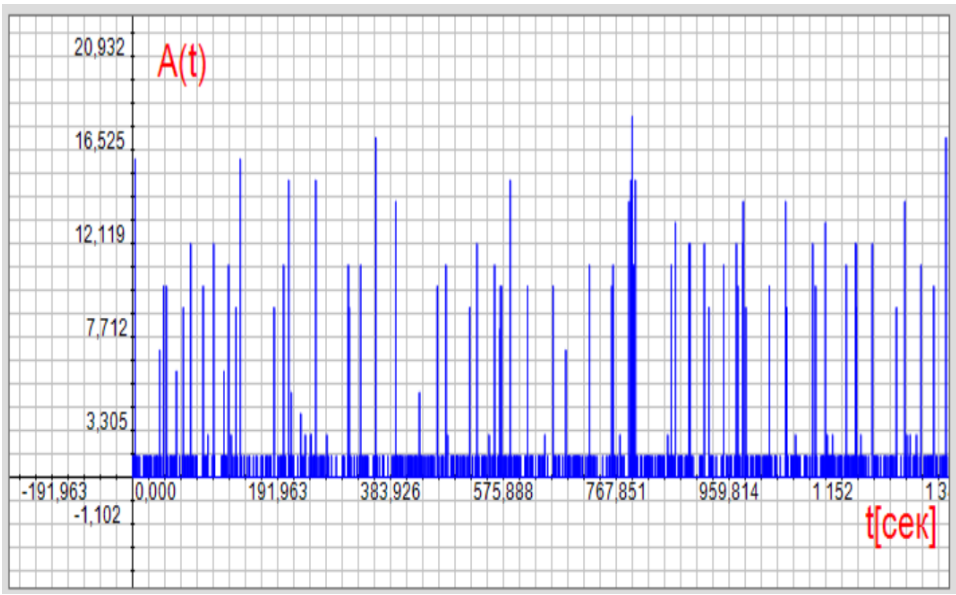


Fig. 1. Numbers of requests on service intervals for the first and second flows at load factor $\rho = 0{,}1$

That is, each batch consisted of exactly one request and, therefore, the second flow was a common Poisson flow with an intensity equal to λ.

Figure 1 combines graphs of the number of requests at service intervals for the first and second flows with the load factor $\rho = 0{,}1$. The Poisson flow is quite uniform and mainly has no more than one request, while the group batch flow in the same interval has more than 10 requests, the numbers of which are distributed by the Poisson law. The patchy nature of a group flow leads to the appearance of large queues during its maintenance.

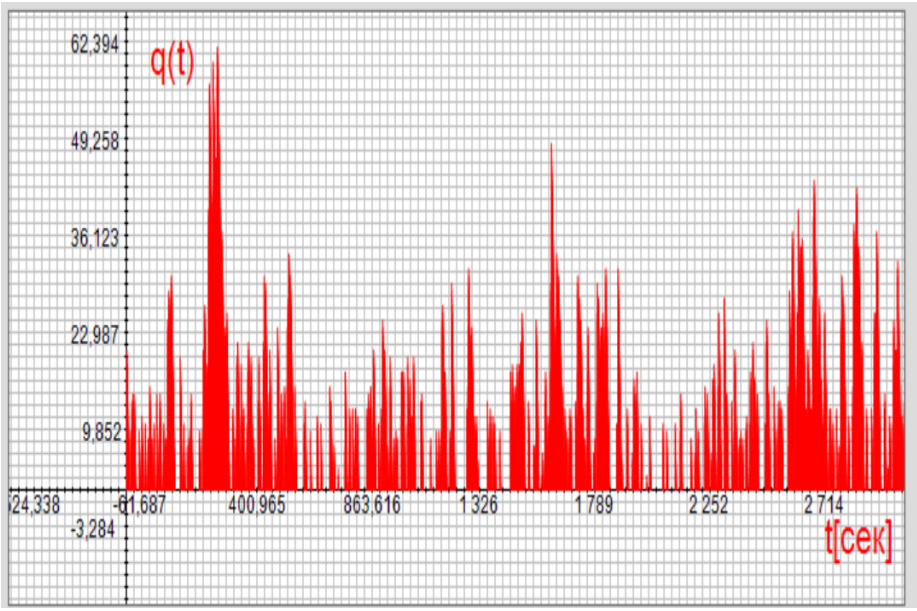


Fig. 2. Queues arising from the maintenance of the group Poisson flow in a single-line queuing system at a load factor of $\rho = 0{,}5$

In Figure 2 you can see a graph of the queue change when servicing a group Poisson flow in a single-line queuing system at load factor, $\rho = 0{,}5$. The maximum values of request numbers in queues exceed 60, which is the result of high flow patchiness.

The most significant interval characteristic of the flows under consideration is the dependence of dispersion $D_m(\rho)$ numbers of service interval requests on the load factor. We have shown that this dependence is linear and for the Poisson distribution of probabilities of numbers of requests in batches, it is determined by the ratio (3). At the specified parameters of the group flow:

$$\nu_k^2 = \frac{D_k}{(\bar{k})^2} = \frac{1}{\bar{k}} = 0{,}1; \; E = \bar{k}(1+\nu_k^2) = 11,$$

while for the common Poisson flow $E = 1$. The dependencies of the dispersion of $D_m(\rho)$ numbers of requests at service intervals on the load factor, which were obtained as a result of simulation of both flows, are shown in figure 3. The above diagram corresponds to a group Poisson flow with an angle of slope $E = 11$. The lower figure represents a normal Poisson flow with an angle of slope $E = 1$.

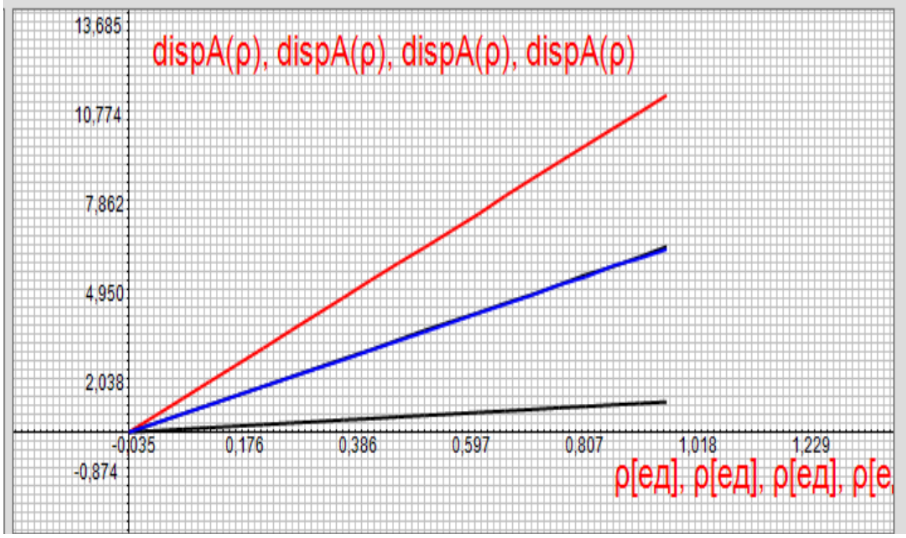


Fig. 3. Dependencies of dispersion $D_m(\rho)$ numbers of requests at service intervals on the load factor

The middle graph shows the flow obtained by summing up the specified flows. You can see that all dependencies are strictly linear. Figure 4 shows the dependencies of average sizes of $\overline{q(\rho)}$ queues on the load factor derived from the simulation of both flows.

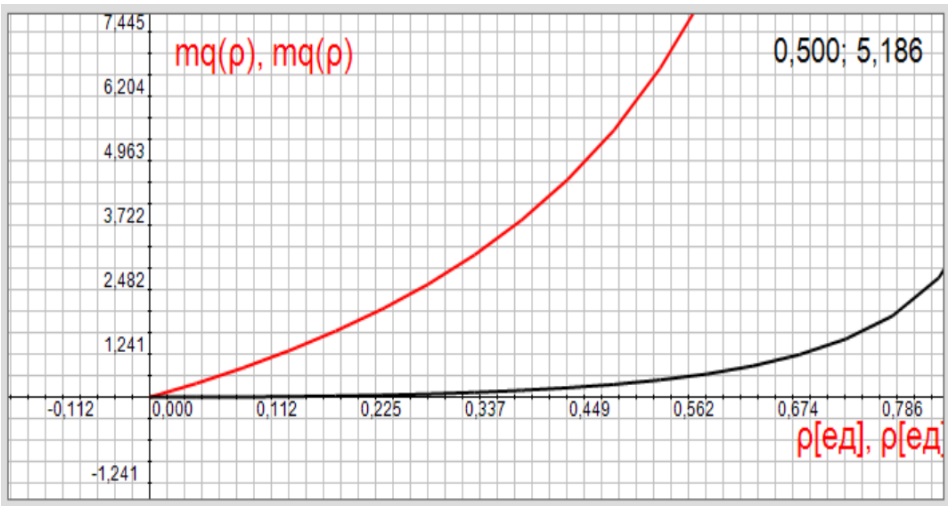


Fig. 4. Dependencies of average queues sizes $\overline{q(\rho)}$ on load factor

The top graph is a group flow, the bottom graph is a Poisson flow. The upper corner shows the queue size value for the group flow, at load factor $\rho = 0{,}5$ obtained directly from the graph, $\overline{q(\rho)} = 5{,}186$. The theoretical value is determined by the formula (4), $\overline{q(\rho)} = 5{,}25$. The slight difference is explained by the simulation process error and the influence of correlation relations.

Queues at small loads. A group Poisson flow was generated with the value of intensity $\lambda = 100$ per second. The flow contained batches of requests having the Poisson distribution of numbers of requests in a batch with average value $\overline{k_1} = 100$ of requests in a batch and intensity of receiving batches $\lambda_1 = 1$ of a batch in a second, $\lambda = \overline{k}_1 \lambda_1 = 100$.

Figure 5 shows the change of numerator $D_m(\rho) \cdot J(\rho)$ values in formula (4) (solid line) and the change of dispersion $D_m(\rho)$ (dot line) for load factors ρ not exceeding 0,5.

Fig. 5. Change of numerator $D_m(\rho) \cdot J(\rho)$ values
and change of dispersion $D_m(\rho)$ values

In the areas where the lines coincide, the dispersion index is equal to one, which means a small influence of the correlation component. The average value of the queue is determined mainly by the dispersion.

Figure 6 illustrates the change in average queue size and the change in dispersion $D_m(\rho)$ (straight line) for load factors ρ not exceeding 0.5. In this section, the difference is about 30%. Let us study this parameter in more detail:

$$\Delta(\rho) = D_m(\rho) - \overline{q(\rho)} = \rho E - \frac{\rho E}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2}.$$

The point of lines crossing represents $\rho_0 = \dfrac{E+1}{2E} \approx 0,5$ loading. The maximum difference value represents $\rho_m = \dfrac{E+1}{2(2E-1)} \approx 0,25$ loading.

The maximum difference $\Delta(\rho_m) \approx 8,3$ exceeds the value of queue $\overline{q(\rho_m)}$ also by approximately 30%.

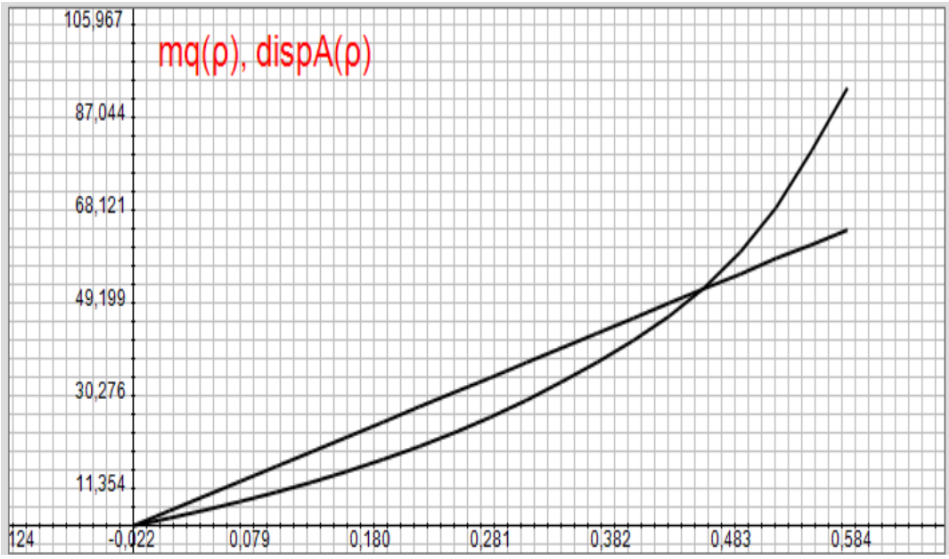


Fig. 6. The change of average values of the queue size and dispersion for load factors ρ not exceeding 0.5

A group flow with an exponential distribution of probabilities of numbers of requests in batches, depending on time intervals between batches

The modeling was carried out in comparison with a group flow with the Poisson distribution of the probability of independent requests in batches. Two flows of batches with the same intensity $\lambda = 1$ and an exponential distribution of probability intervals between neighboring batches were generated. The numbers of requests in batches of the first flow have an exponential distribution of probabilities, with an average value of $\bar{k}_1 = 100$, and are proportional to the lengths of intervals between batches. The numbers of requests in batches of the second flow are distributed according to the Poisson law with the average number of requests in batch $\bar{k}_2 = 200$. This enabled both flows to make the same dispersion of the number of requests at service intervals. 10^5 requests were generated for each of the flows.

Figures 7-8 show graphs of queue changes at load factor $\rho = 0,9$ for the first and second flows, respectively. From figure 7 you can see that the queues, which occur with the appearance of batches of requests, do not intersect in time. There is also no queue before the appearance of each next batch. However, for the second flow, shown in Figure 8, the queues intersect. Moreover, the maximum values of the queues far exceed the maximum values of the first flow.

In Figure 9, some characteristics of the flows are combined for comparison. The dependencies of dispersions $D_m(\rho)$ for both flows are combined and represented by the top (solid) straight line. The dependency of the queue $\overline{q(\rho)}$ for the first flow is also linear; it is represented by a lower (dotted) straight line having an angle of slope twice smaller than the dispersion line, which fully coincides with (6).

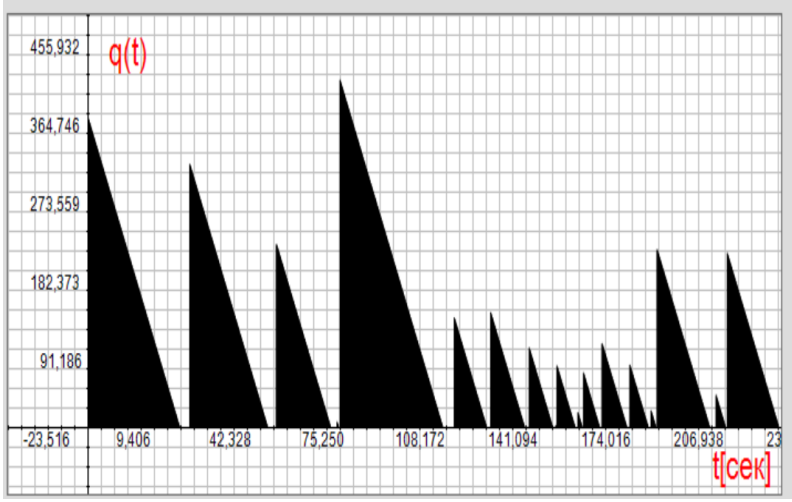


Fig. 7. Resizing queues in time for the first flow

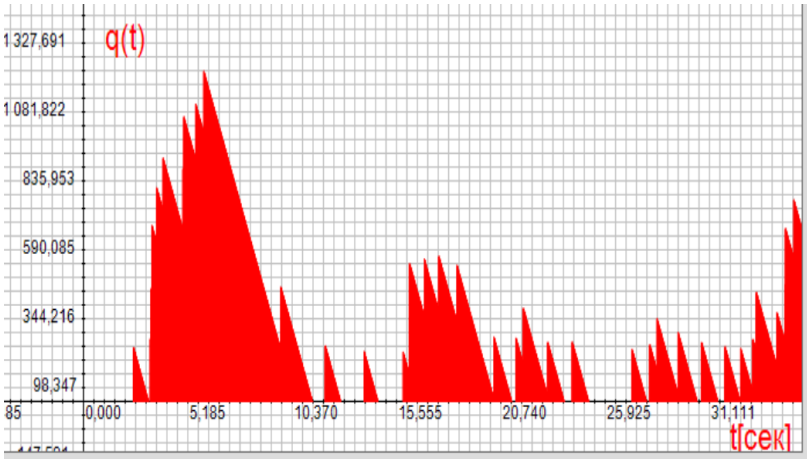


Fig. 8. Resizing queues in time for the second flow

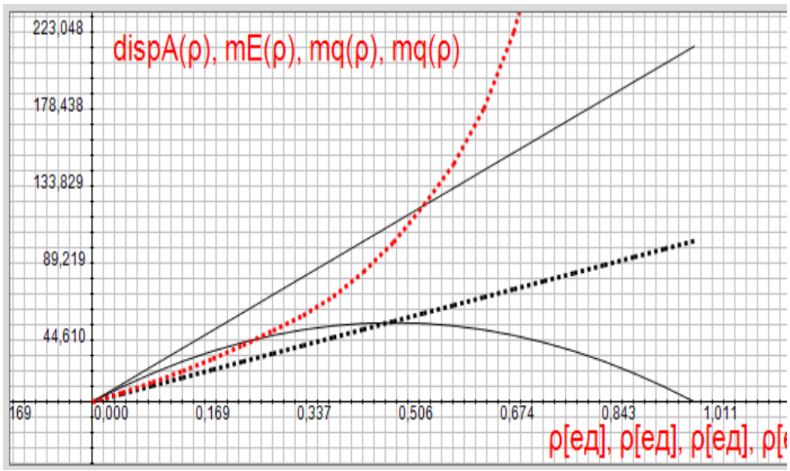


Fig. 9. Dependencies of dispersions $D_m(\rho)$

Both flows are combined (top solid straight line). Queue dependency $\overline{q(\rho)}$ for the first flow (dotted straight line); queue dependency for the second flow (dotted curve line); numerator dependency $mE(\rho)$ in formula (1) for the first flow (arc, solid line).

Approximation of average values of real traffic queues

Analysis of two threads considered above showed that they have fundamentally different characteristics of queue dependencies on load factor. Characteristics of a flow with dependent requests are strictly linear, and the characteristic of a flow with independent numbers of requests in batches increases non-linearly at large loads. Using these differences, we can create a group hyperpoisson flow from two such flows. By selecting the appropriate parameters of this flow, we can get dependencies of the average size of queues $\overline{q(\rho)}$ on the load factor, which are very close to the appropriate characteristics of real traffic.

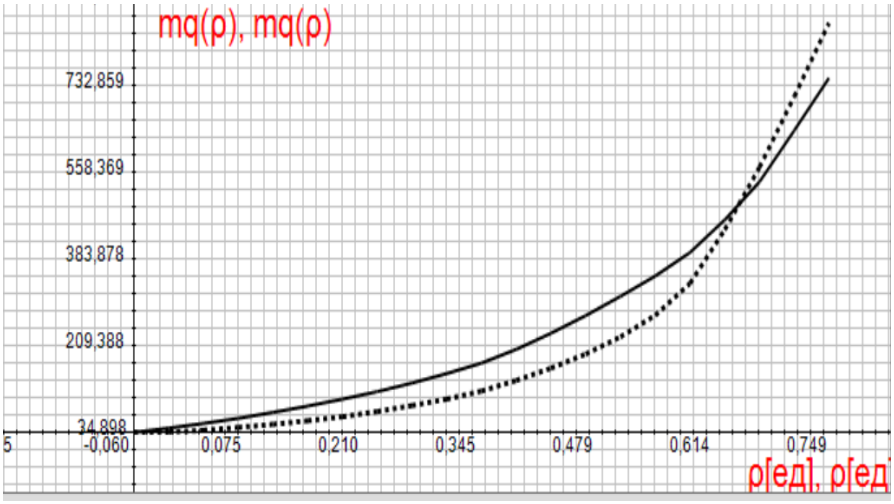


Fig. 10. Dependencies of the average size of queues $\overline{q(\rho)}$
for real video traffic (dotted line) and for group flow (solid line)

Figure 10 shows the dependencies of average queue sizes $\overline{q(\rho)}$ on the load factor for real video traffic and for a group flow that has a Poisson distribution of request numbers in batches with the value $\bar{k} = 420$. We observe a satisfactory coincidence. Nevertheless, the reasons for queues in both cases are significantly different. In the case of video traffic, the major contribution to queue formation is made by correlation relations. In the second case, the major contribution to the queue formation is caused by dispersion, with a slight influence of correlation relations.

This is well illustrated by the dependencies of dispersions of both flows on the load factor presented in Figure 11.

The dispersion sizes of the group Poisson flow request numbers at the same loads considerably exceed the corresponding dispersion values of the real video traffic flow.

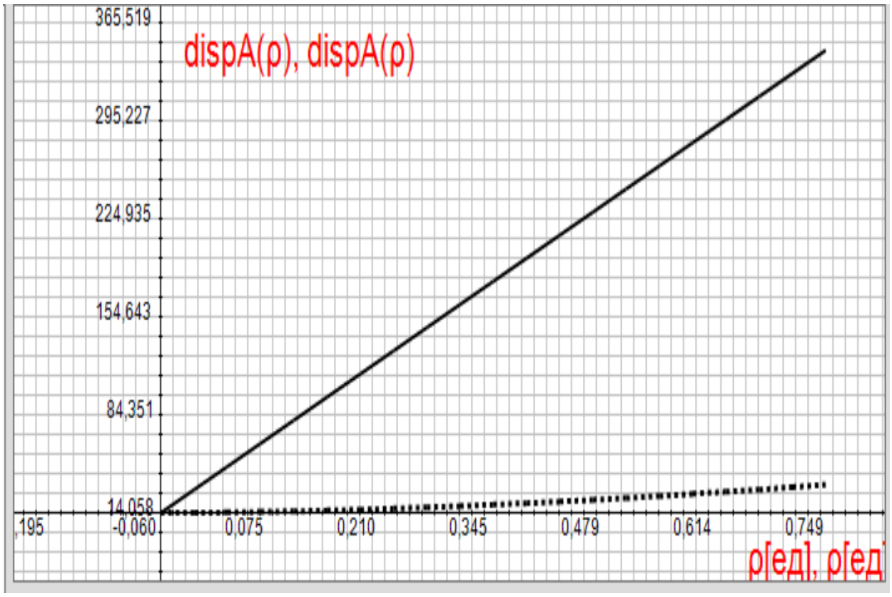


Fig. 11. Dispersion dependencies for real video traffic (dotted line) and for group flow (solid line)

Conclusions

1. The insignificant influence of correlation connections in the group Poisson flow makes it attractive as a model of telecommunication traffic.

2. If several group Poisson flows are summed up, the resulting flow is also a group Poisson flow.

3. The group Poisson flow proposed in this work with the dependent number of requests in batches has a linear characteristic of the average queue size $\overline{q(\rho)}$.

4. In a group flow with an independent number of requests in batches distributed by Poisson law, the covariance component of the numerator in the generalized Khinchin-Pollaczek formula is practically absent, and the average queue size is determined by the dispersion values $D_m(\rho)$ linearly depending on the load factor.

5. The principal difference of characteristics in multiplexing of the mentioned above flows allows to us get the total dependence, which approximates well the characteristic of real telecommunication traffic.

REFERENCES

1. *Vishnevskiy, V.M.; Dudin, A.N.* Mass service systems with the correlated input flows and their application for the telecommunication network modeling (in Russian) // Automatics and telemechanics. 2017. Vol. 8. P. 3–59.
2. *Neuts M.F.* Versatile Markovian point process // Journal of Applied Probability. 1979. Vol. 16, Issue 4. P. 764-779. DOI: https://doi.org/10.2307/3213143.
3. *Dudin A.N., Klimenok V.I.* Mass service systems with correlated flows (in Russian). Minsk: BSU, 2000. 175 p.
4. *Likhttsinder B.Ya.* Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design) (in Russian). Moscow: Hotline - Telecom, 2018. 290 p.
5. Variants of Poisson flow of events (in Russian). URL: https://studfile.net/preview/7316586/ page:7/ (Accessed: 26.09.2019).
6. *Ramaswami V.* The N/G/1 queue and its detailed analysis // Advances in Applied Probability. 1980. Vol. 12. Issue 1. P. 222–261. DOI: https://doi.org/10.2307/1426503.

7. *Lakatos L., Szeidl L., Telek M.* Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications // Springer Science+Business Media. 2013. 388 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8.
8. *Lema M.A., Pardo E., Galinina O., Andreev S., Dohler M.* Flexible Dual-Connectivity Spectrum Aggregation for Decoupled Uplink and Downlink Access in 5G Heterogeneous Systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34. Issue 1. P. 2851–2865. DOI: https://doi.org/10.1109/ JSAC.2016.2615185.
9. *Niknam S., Nasir A.A., Mehrpouyan H., Natarajan B.* A Multiband OFDMA Heterogeneous Network for Millimeter Wave 5G Wireless Applications // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 5640–5648. DOI: https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2016.2604364.
10. *Vishnevsky V., Larionov A., Frolov S.* Design and Scheduling in 5G Stationary and Mobile Communication Systems Based on Wireless Millimeter-Wave Mesh Networks // Distributed Computer and Communication Networks. 2014. Vol. 279. P. 11-27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05209-0_2.
11. *Vishnevsky V.M., Larionov A.A., Ivanov R.E., Dudin M*. Applying graph-theoretic approach for time-frequency resource allocation in 5G MmWave backhaul network // Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). 2016. P. 221–224. DOI: https://doi.org/10.1109/RTUWO.2016.7821888.
12. *Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W., Wilson D.V.* On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1994. Vol. 2. № 1. P. 1–15.
13. *Tsybakov B. S.* Teletraffic model based on the self-similar random process (in Russian) // Radio engineering. 1999. Vol. 5. P. 24–31.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2020 г.

МОДЕЛИ ГРУППОВЫХ ПУАССОНОВСКИХ ПОТОКОВ В УПРАВЛЕНИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫМ ТРАФИКОМ

Б.Я. Лихтциндер, Ю.О. Бакай
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23

E-mail: lixt@psuti.ru

Аннотация. *В статье рассмотрены различные алгоритмы управления потоковым видео трафиком. Анализируются особенности трафика видеокодеков, который имеет явно выраженный пачечный характер. Рассматриваются модели одноканальных систем массового обслуживания с входными потоками, имеющими произвольную корреляцию. Для данных систем приведена обобщённая формула Хинчина-Поллачека. Показана перспективность применения интервальных методов анализа очередей в системах массового обслуживания с коррелированными входными потоками. В качестве модели телекоммуникационного трафика предлагается использовать групповые неординарные пуассоновские потоки. Рассмотрены интервальные характеристики указанных потоков и показана перспективность их применения. Рассмотрены вопросы мультиплексирования групповых потоков при обработке в системах массового обслуживания. Показано, что при суммировании нескольких групповых пуассоновских потоков, результирующий поток также является групповым пуассоновским потоком. Сделанные выводы подтверждены результатами имитационного моделирования. Рассмотрены основные причины задержек пакетов в очередях телекоммуникационной сети и показано влияние этих задержек на процессы управления потоковым видео трафиком.*

Ключевые слова: *видеотрафик, управление, задержки, очереди, битрейт, алгоритм, видеокодеки, групповые потоки, моделирование.*

Лихтциндер борис Яковлевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Сети и системы связи».

Бакай Юлия Олеговна, студентка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вишневский В.М., Дудин А.Н.* Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 3–59.
2. *Neuts M.F.* Versatile Markovian point process // Journal of Applied Probability. 1979. Vol. 16, Issue 4. P. 764-779. DOI: https://doi.org/10.2307/3213143.
3. *Дудин А.Н., Клименок В.И.* Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ, 2000. 175 с.
4. *Лихтциндер Б.Я.* Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия - Телеком, 2018. 290 с.
5. Варианты пуассоновского потока событий. URL: https://studfile.net/preview/7316586/ page:7/ (дата обращения: 26.09.2019).
6. *Ramaswami V.* The N/G/1 queue and its detailed analysis // Advances in Applied Probability. 1980. Vol. 12. Issue 1. P. 222–261. DOI: https://doi.org/10.2307/1426503.
7. *Lakatos L., Szeidl L., Telek M.* Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications // Springer Science+Business Media. 2013. 388 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8.
8. *Lema M.A., Pardo E., Galinina O., Andreev S., Dohler M.* Flexible Dual-Connectivity Spectrum Aggregation for Decoupled Uplink and Downlink Access in 5G Heterogeneous Systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34. Issue 1. P. 2851–2865. DOI: https://doi.org/10.1109/ JSAC.2016.2615185.
9. *Niknam S., Nasir A.A., Mehrpouyan H., Natarajan B.* A Multiband OFDMA Heterogeneous Network for Millimeter Wave 5G Wireless Applications // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 5640–5648. DOI: https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2016.2604364.
10. *Vishnevsky V., Larionov A., Frolov S.* Design and Scheduling in 5G Stationary and Mobile Communication Systems Based on Wireless Millimeter-Wave Mesh Networks // Distributed Computer and Communication Networks. 2014. Vol. 279. P. 11-27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05209-0_2.
11. *Vishnevsky V.M., Larionov A.A., Ivanov R.E., Dudin M.* Applying graph-theoretic approach for time-frequency resource allocation in 5G MmWave backhaul network // Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). 2016. P. 221–224. DOI: https://doi.org/10.1109/RTUWO.2016.7821888.
12. *Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W., Wilson D.V.* On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1994. Vol. 2. № 1. P. 1–15.
13. *Цыбаков Б.С.* Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. 1999. № 5. С. 24–31.

doi: 10.14498/tech.2020.3.6

Электротехника

УДК 530.1

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАНТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ГРАВИТАЦИОННЫМ ПОЛЕМ И ПРОБЛЕМА ГРАВИТОНА

А.Н. Волобуев[1], А.М. Штеренберг[2], П.К. Кузнецов[3]

[1] Самарский государственный медицинский университет
Россия, 443099, г. Самара, ул. Чапаевская, 89

[2] Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: volobuev47@yandex.ru; ashter53@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены проблемы, связанные с распространением гравитационного поля. Показан закон изменения частоты электромагнитного излучения в гравитационном поле. Исследована проблема квантования гравитационного поля. Найдена энергия гравитона двумя способами. Во-первых, на основе использования квантового гравитационного эйконала и лагранжиана гравитационного поля найдена энергия отдельного гравитона. Показано, что гравитон обладает массой, пропорциональной его частоте. Во-вторых, за счет отказа от симметричного тензора напряжений в составе тензора энергии-импульса найдена квантовая форма тензора энергии-импульса в уравнении Эйнштейна. Это позволило найти энергию отдельного гравитона. Оба способа нахождения энергии гравитона дали один и тот же результат. Показано, что решение уравнения Эйнштейна с использованием квантовой формы тензора энергии-импульса для определенного направления представляет собой сумму гравитационных волн и гравитона. Выяснено, что при приближении гравитона к массивным телам (двойным звездам), излучающим гравитационные волны, происходит резонансная перекачка энергии гравитационного поля этих тел в гравитоны с увеличением их массы и частоты. Это дает возможность регистрации гравитонов с помощью детектора, расположенного вблизи массивных тел. Сделано предположение, что темная энергия гравитационного поля представляет собой всю совокупность энергий гравитонов космического пространства.*

Ключевые слова: *электромагнитное излучение, гравитационный эйконал, метрический тензор, уравнение Эйнштейна, гравитационные волны, тензор энергии-импульса, регистрация гравитонов.*

Волобуев Андрей Николаевич (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Медицинская физика, математика и информатика».

Штеренберг Александр Моисеевич (д.ф.-м.н., проф.), заведующий кафедрой «Общая физика, геология и физика нефтегазового производства».

Кузнецов Павел Константинович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Введение

Современная теория гравитации – общая теория относительности Эйнштейна – является основой для расчета различных явлений. Она является обобщением ньютоновской динамики, включая закон всемирного тяготения. Так же как и ньютоновская динамика, общая теория относительности – не квантовая теория. Уравнение Эйнштейна для гравитационного поля не имеет стохастической природы.

Проблема квантования гравитационного поля до сих пор не решена, хотя для ее решения было приложено много усилий [1–4].

Недавно была решена задача регистрации гравитационных волн [5], которые описываются уравнением Эйнштейна [6]. Это еще одно экспериментальное подтверждение справедливости общей теории относительности.

С физической точки зрения общая теория относительности предполагает, что масса искривляет пространство-время. Кривизна пространства-времени влияет на все частицы, движущиеся в пространстве, включая и те, которые создают эту кривизну. Кривизна пространства-времени в общей теории относительности отождествляется с возникновением некоторого гравитационного поля, благодаря которому взаимодействуют массовые частицы.

Гравитационные волны представляют собой распространяющиеся колебания кривизны пространства-времени, подобно тому, как волны на водной поверхности являются распространяющимися колебаниями по поверхности частиц воды.

Однако в представленной физической картине гравитации нет главного элемента – квантования гравитационных волн. Попытки решить проблему квантования гравитационных волн с помощью введения 5-мерного пространства-времени [7] вряд ли могут привести к успеху. По-видимому, теория 5-мерного пространства-времени в настоящее время имеет только историческую ценность. Путем сравнения расстояния от источника гравитационных волн, рассчитанного по затуханию экспериментально регистрируемых гравитационных волн и по красному смещению электромагнитного излучения, было установлено [8], что размерность нашего пространства-времени равна $\sim 4 \pm 0{,}1$. Таким образом, наше пространство-время описывается четырьмя координатами: временем и тремя пространственными координатами.

Кванты гравитационного поля называются гравитонами. Гравитоны представляют собой локальное сморщивание пространства-времени, которое распространяется со скоростью света по более гладкому пространству.

Предполагая в целом корректность уравнения Эйнштейна для гравитационного поля, мы исследуем некоторые особенности квантования гравитационных волн.

1. Фотон в постоянном однородном гравитационном поле

Прежде чем приступать к квантованию гравитационного поля, рассмотрим, как изменяется частота квантов электромагнитного излучения (фотонов) в постоянном однородном гравитационном поле. Исследование выполним в плоском пространстве-времени, носящем название пространства Минковского. Интервал в инерциальной системе отсчета имеет вид [6]

$$\begin{aligned} ds^2 &= c^2 d\tau^2 - dX^2 - dY^2 - dZ^2 = \\ &= g_{00}\left(dX^0\right)^2 - g_{11}\left(dX^1\right)^2 - g_{22}\left(dX^2\right)^2 - g_{33}\left(dX^3\right)^2, \end{aligned} \tag{1}$$

где $X = X^1, Y = X^2, Z = X^3$ – декартовы координаты;

c – скорость света в вакууме;

$d\tau$ – интервал истинного времени между событиями, так что $cd\tau = X^0$, $g_{00} = 1, g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$ – компоненты метрического тензора, сигнатура которого $(+, -, -, -)$.

Из (1) следует:

$$d\tau = \frac{1}{c}\sqrt{g_{00}}dX^0. \tag{2}$$

В гравитационном поле $g_{00} < 1$. Поэтому истинное (или собственное) время течет тем медленнее, чем меньше g_{00} в данной точке пространства ($\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ уменьшается; τ_2 в поле меньше, чем τ_2 вне поля). Часы в гравитационном поле отстают.

Компонента метрического тензора g_{00} в гравитационном поле уменьшается [6]:

$$g_{00} = \left(1 + \frac{\varphi_g}{c^2}\right)^2 \text{ или } \sqrt{g_{00}} = 1 + \frac{\varphi_g}{c^2}, \tag{3}$$

где φ_g – гравитационный потенциал поля, отрицательная величина, так что ускорение $\dot{\boldsymbol{V}} = -\mathrm{grad}\varphi_g$.

Для дальнейшего анализа мы используем концепцию эйконала. Эйконал – это фаза периодической функции, описывающей поле электромагнитной волны:

$$\phi = \boldsymbol{kq} - \delta\tau, \tag{4}$$

где $\boldsymbol{k}$ – волновой вектор эйконала;

$\boldsymbol{q}$ – координатный вектор эйконала (не обязательно декартовы координаты);

δ – циклическая частота эйконала.

Учитывая (2) и (4), можно найти частоту эйконала (частоту фотона в данной точке в истинном времени):

$$\delta = -\frac{\partial\phi}{\partial\tau} = -\frac{\partial\phi}{\partial X^0}\frac{\partial X^0}{\partial\tau} = -\frac{c}{\sqrt{g_{00}}}\frac{\partial\phi}{\partial X^0} \tag{5}$$

Если использовать мировое время t (вне гравитационного поля), так что $t = \frac{X^0}{c}$, то циклическая частота фотона, измеренная в мировом времени, равна $\delta_0 = -\frac{\partial\phi}{\partial t} = -c\frac{\partial\phi}{\partial X^0}$. Следовательно, согласно (5) с учетом (3) имеем:

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt{g_{00}}} = \frac{\delta_0}{1 + \frac{\varphi_g}{c^2}} \tag{6}$$

где δ_0 – частота фотона при отсутствии гравитационного поля.

Таким образом, частота фотона зависит от величины потенциала гравитационного поля. Так как потенциал гравитационного поля – величина отрицательная, то при приближении к телам, создающим поле, частота фотона δ растет, а при удалении – падает (красное смещение). Например, для тела массой M потенциал поля зависит от радиуса r по формуле $\varphi_g = -k\dfrac{M}{r}$, где $k = 6.67\cdot 10^{-8}\,\dfrac{см^3}{г\cdot с}$ – гравитационная постоянная.

Если концепцию эйконала распространить на гравитационное поле, то соотношение (6) должно быть справедливо и для гравитационных волн.

Волновой вектор эйконала (или волновой вектор фотона) $\boldsymbol{k} = \dfrac{\partial\phi}{\partial\boldsymbol{q}}$, а 4-импульс в декартовых координатах равен $k_i = -\dfrac{\partial\phi}{\partial X_i}$. Но для 4-импульса справедлива формула $k_i k^i = k^0 k^0 - \boldsymbol{kk} = 0$. Следовательно, $\dfrac{\partial\phi}{\partial X_i}\dfrac{\partial\phi}{\partial X^i} = 0$ – т.н. уравнение эйконала.

Заметим, что эйконал – квантуемая величина. Квант эйконала равен:

$$S_0 = \hbar \tag{7}$$

где $\hbar$ – приведенная постоянная Планка.

2. Уравнение Эйнштейна для гравитационного поля

Гравитационное поле описывается уравнением Эйнштейна. Для записи уравнения Эйнштейна необходимо прежде всего математически описать кривизну пространства-времени. Для описания математической кривизны пространства-времени используется тензор кривизны (тензор Римана) [6]:

$$R_{iklm} = \left(\frac{\partial\Gamma^i_{km}}{\partial X^l} - \frac{\partial\Gamma^i_{kl}}{\partial X^m}\right) + \left(\Gamma^i_{nl}\Gamma^n_{km} - \Gamma^i_{nm}\Gamma^n_{kl}\right), \tag{8}$$

где Γ^i_{kl} – проекция производной от орта $\boldsymbol{e}_k$ по координате X^l на координатную ось X^i – символ Кристоффеля $\Gamma^i_{kl}\boldsymbol{e}_i = \dfrac{\partial \boldsymbol{e}_k}{\partial X^l}$. Символы Кристоффеля – это функции координат, выражающие изменение компонент вектора при его параллельном переносе.

Все индексы, нижние (ковариантные, обычно функциональные величины) и верхние (контравариантные, обычно координатные величины), принимают значения 0 (временной индекс), 1, 2, 3 (координатные индексы). Как обычно, суммирование ведется по повторяющимся в произведениях индексам.

Символы Кристоффеля можно выразить через метрический тензор по формуле $\Gamma^i_{kl} = \dfrac{1}{2}g^{im}\left(\dfrac{\partial g_{mk}}{\partial X^l} + \dfrac{\partial g_{ml}}{\partial X^k} - \dfrac{\partial g_{kl}}{\partial X^m}\right)$ [6]. Таким образом, тензор кривизны

пространства-времени (8) определяется скоростью и быстротой изменения метрического тензора g_{ik} в пространстве-времени. В общем случае имеется 10 компонент метрического тензора – 4 с одинаковыми индексами (00, 11, 22, 33) и 6 с разными (01, 02, 03, 12, 13, 23, $C_4^2 = \frac{4 \cdot 3}{1 \cdot 2} = 6$).

Тензор кривизны – тензор четвертого ранга. Физическая кривизна пространства-времени может описываться только тензором второго ранга, т. к. тензор энергии-импульса, создающий эту кривизну, является тензором второго ранга. Поэтому перейдем с помощью операции свертывания в (7) к тензору второго ранга (тензору Риччи):

$$R_{ik} = g^{lm} R_{limk} = \left(\frac{\partial \Gamma_{ik}^{l}}{\partial X^{l}} - \frac{\partial \Gamma_{il}^{l}}{\partial X^{k}} \right) + \left(\Gamma_{ik}^{l} \Gamma_{lm}^{m} - \Gamma_{il}^{m} \Gamma_{km}^{l} \right). \tag{9}$$

Тензор Риччи симметричен: $R_{ik} = R_{ki}$.

Далее введем скалярную кривизну пространства-времени по формуле

$$R = g^{ik} R_{ik}, \tag{10}$$

где g^{ik} – контравариантный метрический тензор.

Используя тензор Риччи (9), скалярную кривизну пространства-времени (10), а также метрический тензор g_{ik}, Эйнштейн записал основное уравнение для гравитационного поля:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi k}{c^4} T_{ik}. \tag{11}$$

Левая часть этого уравнения называется тензором Эйнштейна $E_{ik} = R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R$ и характеризует геометрические свойства пространства-времени, в частности его кривизну. Правая часть уравнения включает в себя тензор энергии-импульса второго ранга, характеризующий источник, создающий кривизну пространства-времени:

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} T_{00} & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ T_{10} & T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{20} & T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{30} & T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix}. \tag{12}$$

Уравнение Эйнштейна (11) можно записать в другом виде. Умножим уравнение (11) слева на контравариантный метрический тензор g^{ik}:

$$g^{ik} R_{ik} - \frac{1}{2} g^{ik} g_{ik} R = \frac{8\pi k}{c^4} g^{ik} T_{ik}. \tag{13}$$

Учитывая $R = g^{ik} R_{ik}$ и $g^{ik} g_{ik} = 4$ (в четырехмерном пространстве-времени), найдем:

$$-R=\frac{8\pi k}{c^4}\mathrm{Sp}T_{ik}=\frac{8\pi k}{c^4}T\,, \tag{14}$$

где обозначено $\mathrm{Sp}T_{ik}=T$.

Подставив (14) в уравнение Эйнштейна (11), найдем:

$$R_{ik}=\frac{8\pi k}{c^4}\left(T_{ik}-\frac{1}{2}g_{ik}T\right). \tag{15}$$

За пределами тела, создающего гравитационное поле, тензор энергии-импульса равен нулю $T_{ik}=T=0$. В этом случае согласно (15) $R_{ik}=0$.

Нулевая величина тензора Риччи не означает, что отсутствует кривизна пространства-времени. Кривизна пространства-времени, которая характеризуется тензором Римана (7), сохраняется вдали от тел, создающих эту кривизну.

3. Действие системы гравитационное поле – частица

Квантование гравитационных волн проведем путем квантования объемной плотности действия в пространстве обобщенных координат:

$$s=\int l\sqrt{-g}dt=\int(T-U)\sqrt{-g}dt=\int T\sqrt{-g}dt-\int U\sqrt{-g}dt, \tag{16}$$

где $l=T-U$ – суммарный лагранжиан гравитационного поля, частицы и их взаимодействия [9];

$\sqrt{-g}$ – величина, определяющая зависимость нормировочного элемента объема от кривизны пространства-времени, g – определитель метрического тензора.

Рассмотрим лагранжиан l системы гравитационное поле – частица. Он имеет вид

$$l=T-U=(\rho-\rho_0)c^2-(\rho\phi_g-l_g), \tag{17}$$

где $T=(\rho-\rho_0)c^2$ – объемная плотность кинетической энергии частицы в гравитационном поле;

$U=(\rho\varphi_g-l_g)$ – объемная плотность потенциальной энергии частицы в поле (энергии взаимодействия частицы и поля), включающая лагранжиан самого поля [6]:

$$l_g=\frac{c^4}{16\pi k}R, \tag{18}$$

где R – скалярная кривизна пространства-времени;

ρ – плотность частицы в поле;

ρ_0 – плотность массы покоя частицы;

φ_g – гравитационный потенциал поля.

Лагранжиан подчиняется уравнению Лагранжа, которое имеет вид

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial l}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right)=\frac{\partial l}{\partial \boldsymbol{q}}. \tag{19}$$

Для обобщенной скорости используем величину

$$\dot{\boldsymbol{q}}=\sqrt{2T} \tag{20}$$

В этом случае выполняется известная формула для объемной плотности энергии:

$$w=\dot{\boldsymbol{q}}\frac{\partial l}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}-l=\sqrt{2T}\frac{\partial l}{\partial\sqrt{2T}}-T+U=\sqrt{T}\frac{\partial l}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial\sqrt{T}}-T+U=T+U \tag{21}$$

вследствие $\frac{\partial l}{\partial T}=1$.

Из формул (17) и (20) следует, что объемные плотности кинетической и потенциальной энергии частицы в гравитационном поле равны

$$T=\frac{\dot{\boldsymbol{q}}^2}{2}=(\rho-\rho_0)c^2,\ U=\rho\varphi_g-l_g. \tag{22}$$

Таким образом, обе составляющие объемной плотности действия зависят плотности тела, которое создает кривизну пространства-времени. Поэтому квантованию в уравнении Эйнштейна (11) должна подлежать только правая часть уравнения, зависящая от массы, создающей гравитационное поле. Время – неквантуемая величина. По-видимому, неквантуемыми являются все параметры пространства-времени (скалярная кривизна, метрический тензор, тензор Риччи и т. д.). Квантованию может подлежать только тензор энергии-импульса.

При небольших скоростях V движения тел $T=\rho c^2\left(1-\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}\right)\approx\frac{\rho V^2}{2}$.

Принимая в качестве обобщенной координаты $\boldsymbol{q}$ пространственную координату, получаем в левой части уравнения (19):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial l}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right)\approx\rho\boldsymbol{a}, \tag{23}$$

где $\boldsymbol{a}$ – ускорение движения частицы плотностью ρ.

Правая часть уравнения (19) в соответствии с (22) и $l=T-U$ преобразуется к виду

$$\frac{\partial l}{\partial \boldsymbol{q}}=-\frac{\partial(\rho\varphi_g)}{\partial \boldsymbol{q}}+\frac{\partial l_g}{\partial \boldsymbol{q}}=\boldsymbol{f}+\frac{\partial l_g}{\partial \boldsymbol{q}} \tag{24}$$

где $\boldsymbol{f}=-\frac{\partial(\rho\varphi_g)}{\partial \boldsymbol{q}}$ – объемная плотность гравитационной силы, действующей на частицу плотностью ρ со стороны других тел.

При использовании (18) находим, что величина

$$\boldsymbol{f}_g = \frac{\partial l_g}{\partial \boldsymbol{q}} = \frac{c^4}{16\pi k}\frac{\partial R}{\partial \boldsymbol{q}} \tag{25}$$

представляет собой объемную плотность силы, действующей на частицу за счет римановой кривизны пространства-времени R.

Несколько замечаний о гравитационном вакууме. Аналогично предположению об электромагнитном вакууме можно сделать предположение о существовании гравитационного вакуума.

В этом случае уравнение Эйнштейна (11) изменится [10]:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi k}{c^4} T_{ik} - g_{ik}\Lambda, \tag{26}$$

где Λ – космологическая постоянная.

Предположим, что массовые тела, создающие гравитационное поле в пространстве, отсутствуют: $T_{ik} = 0$ – гравитационный вакуум.

Умножим уравнение (26) слева на контравариантный метрический тензор g^{ik}:

$$g^{ik} R_{ik} - \frac{1}{2} g^{ik} g_{ik} R = -g^{ik} g_{ik}\Lambda. \tag{27}$$

Учитывая $R = g^{ik} R_{ik}$ и $g^{ik} g_{ik} = 4$, найдем:

$$R_\Lambda = 4\Lambda. \tag{28}$$

Индекс в (28) означает, что величина полученной скалярной кривизны пространства-времени определяется только космологической постоянной Λ.

Таким образом, гравитационный вакуум создает принципиально неустранимую постоянную (в случае постоянства Λ) кривизну пространства-времени, которая по оценкам равна $R_\Lambda = 4 \cdot 10^{-55}\, см^{-2}$ [10]. Вакуумная кривизна пространства-времени вследствие $\frac{\partial R_\Lambda}{\partial \boldsymbol{q}} = 0$ согласно (25) не создает сил, действующих на массовые частицы.

4. Энергия гравитона и квантовый гравитационный эйконал

Квант гравитационного поля – гравитон, как квантовый эффект гравитационного излучения, может распространяться вдали от массивных тел. Он создает искривление риманова пространства-времени. Поэтому гравитон обладает массой. Масса гравитона равна

$$m = \frac{E}{c^2}, \tag{29}$$

где E – энергия гравитона;

c – скорость света.

След T тензора энергии-импульса в уравнении Эйнштейна связан со скаляр-

ной кривизной пространства-времени R соотношением (14).

Если гравитон распространяется в направлении оси X_1, то диагональные компоненты волновых пульсаций метрического тензора вследствие поперечности гравитационных волн следующие: $h_{11}=0$, $h_{22}=-h_{33}$ [10]. Такое же соотношение компонент должно быть и в тензоре энергии-импульса гравитона (12). Поэтому след тензора энергии-импульса гравитона равен

$$T=T_{00}=\frac{m}{\mathrm{V}}c^2=\frac{E}{\mathrm{V}}, \tag{30}$$

где V – нормировочный объем.

В соответствии с (14) скалярная кривизна пространства равна

$$R=-\frac{8\pi k}{c^4}\frac{E}{\mathrm{V}}. \tag{31}$$

Действие гравитационного поля равно [6]

$$S=\int l_g\sqrt{-g}d\Omega=\int l_g\sqrt{-g}d\mathrm{V}d\left(ct\right), \tag{32}$$

где $d\Omega=d\mathrm{V}d\left(ct\right)$ – элемент пространственно-временного объема.

Величину $\sqrt{-g}$ ввиду ее малого значения за счет гравитона полагаем равной единице. При использовании пространственно-временного объема в виде $d\Omega=d\mathrm{V}d\left(ct\right)$ лагранжиан гравитационного поля в отличие от (18) нужно брать в виде $l_g=\frac{c^3}{16\pi k}R$.

Подставляя эту форму лагранжиана в (32) и предполагая примерное постоянство скалярной кривизны в области гравитона, найдем:

$$S=\int l_g d\mathrm{V}d\left(ct\right)=\frac{c^4}{16\pi k}\mathrm{V}Rt+C, \tag{33}$$

где C – постоянная интегрирования, которая может зависеть от X_1.

Подставляя (31) в (33), имеем:

$$S=-\frac{1}{2}Et+C. \tag{34}$$

Далее аналогично электромагнитному полю, см. (7), введем в рассмотрение понятие кванта гравитационного эйконала $S=\hbar\phi$, где $\hbar$ – приведенная постоянная Планка, $\phi=rX_1-\omega t$ – его фаза, r – волновое число гравитона, ω – его собственная частота. Предполагаем функцию кванта гравитационного эйконала $S\left(X_1,t\right)$ достаточно близкой к линейной в слабом гравитационном поле [6, 11]. Отметим эквивалентность кванта гравитационного эйконала и действия системы гравитационное поле – частица. Обе величины подчиняются принципу минимума (принципу Мопертюи для действия или Ферма для эйконала) [6].

Приравнивая квант гравитационного эйконала и действие, находим:

$$S = \hbar \quad \hbar \quad t) = -\frac{1}{2}Et + C. \tag{35}$$

Из формулы (35) следует, что энергия гравитона равна

$$E = 2\hbar \tag{36}$$

а величина $C = 2\hbar r X_1$. Спин гравитона равен $\pm 2\hbar$.

Энергия релятивистской массовой частицы равна $E = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4}$. Поэтому формула (36) позволяет предположить, что в отличие от обычной частицы масса покоя гравитона равна нулю $m_0 = 0$, а импульс гравитона равен $p = \frac{E}{c} = \frac{2\hbar\omega}{c} = 2\hbar r$. Одно из отличий гравитона от фотона заключается в том, что масса фотона всегда равна нулю, а масса гравитона равна нулю только в покое. Однако, как и фотон, гравитон не может находиться в состоянии покоя.

Подставляя (36) в (29), находим $m = \frac{E}{c^2} = \frac{2\hbar\omega}{c^2}$, т. е. масса гравитона пропорциональна его частоте. Если для гравитона, по аналогии с фотоном, справедливо правило «красного смещения», то при удалении от массивных тел его частота, а следовательно, и масса должны уменьшаться вплоть до исчезновения гравитона (гравитонная темнота[1]). При приближении к массивным телам частота гравитона и его масса должны увеличиваться.

Если принять, например, частоту фонового теплового гравитационного излучения $\omega = 1.26 \cdot 10^{12} c^{-1}$ [10], то энергия гравитона равна $E = 2\hbar\omega = 2.66 \cdot 10^{-15}\, зрг = 0.00166 эВ$.

Масса гравитона (29) фонового теплового гравитационного излучения $m = 2.96 \cdot 10^{-26}\, г$.

Распространение гравитона происходит в направлении нормали к поверхности постоянного эйконала. При этом средний радиус кривизны поверхности постоянного эйконала (кривизны риманова пространства) в данном приближении (слабое гравитационное поле) много больше длины волны гравитона $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ [11].

5. Квантовая форма тензора энергии-импульса

Рассмотрим тензор энергии-импульса (12) более подробно. Считается, что в этот тензор как составляющий входит тензор напряжений:

$$\sigma_{ik} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \sigma_Z \end{pmatrix}, \tag{37}$$

[1] Возможно, что во Вселенной имеются живые существа, видящие с помощью гравитонов, также как земные существа видят с помощью фотонов.

где T_{11}, T_{22}, T_{33} – нормальные напряжения, остальные компоненты $\sigma_{ik} = T_{ik}$ для $i \neq k$ – тангенциальные напряжения.

Компонента $T_{00} = \rho c^2$ – объемная плотность энергии массовой частицы или гравитона; T_{10}, T_{20}, T_{30} – компоненты плотности импульса, умноженные на скорость света *c*; T_{01}, T_{02}, T_{03} – компоненты плотности потока энергии, деленные на *c*.

В основу дальнейших исследований положим предположение об отсутствии возникновения напряженного состояния пустого пространства вследствие его кривизны.

В [12, 13] показано, что в жидкости или газе есть неопределенность в знаке тангенциальных напряжений. Более того, тензор напряжений только приближенно описывает напряженное состояние жидкости или газа. В жидкости или газе тензор напряжений отсутствует. Для расчета потоков жидкости или газа необходимо использовать векторную формулу, связывающую силу $d\boldsymbol{F}$ и скорость жидкости $\boldsymbol{V}$ [12, 13]:

$$d\boldsymbol{F} = \overleftrightarrow{\eta}\, d\boldsymbol{S} \times \mathrm{rot}\boldsymbol{V}, \tag{38}$$

где $d\boldsymbol{S}$ – площадь соприкасающихся слоев в потоке;

$\overleftrightarrow{\eta}$ – тензор вязкости второго ранга, диагональные компоненты которого являются молекулярной вязкостью, а недиагональные компоненты – турбулентной вязкостью.

В потоке жидкости или газа, например в направлении оси *X*, направление векторов в формуле (38) показано на рис. 1.

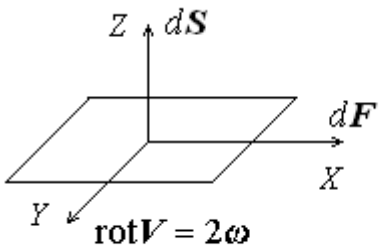


Рис. 1. Направление векторов в формуле (38)

Для наших целей в формуле (38) будем использовать циклическую частоту вращения среды $\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2}\mathrm{rot}\boldsymbol{V}$ [14], следовательно, формулу можно записать в виде

$$d\boldsymbol{F} = 2\overleftrightarrow{\eta}\, d\boldsymbol{S} \times \boldsymbol{\omega}. \tag{39}$$

Скалярный вариант формулы (39) имеет вид

$$\begin{aligned} dF_X\boldsymbol{i} + dF_Y\boldsymbol{j} + dF_Z\boldsymbol{k} = 2\eta\{&(dS_Y\omega_Z - dS_Z\omega_Y)\boldsymbol{i} + (dS_Z\omega_X - dS_X\omega_Z)\boldsymbol{j} + \\ &+ (dS_X\omega_Y - dS_Y\omega_X)\boldsymbol{k}\} \end{aligned} \tag{40}$$

где $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ – орты координат 3-мерного пространства.

Предполагая пространство гомогенным, используем скалярный вариант тензора вязкости η.

При использовании формулы (38) неопределенность в знаке тангенциальных напряжений и некоторые другие проблемы, связанные с тензором напряжений [12], на которых мы не будем останавливаться, исчезают.

Запишем тензор энергии-импульса (12) в виде

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} \rho c^2 & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ T_{10} & \dfrac{dF_1}{dS_1} & \dfrac{dF_2}{dS_1} & \dfrac{dF_3}{dS_1} \\ T_{20} & \dfrac{dF_1}{dS_2} & \dfrac{dF_2}{dS_2} & \dfrac{dF_3}{dS_2} \\ T_{30} & \dfrac{dF_1}{dS_3} & \dfrac{dF_2}{dS_3} & \dfrac{dF_3}{dS_3} \end{pmatrix}, \tag{41}$$

где проведено цифровое переобозначение индексов.

Учитывая (40), найдем:

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} \rho c^2 & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ T_{10} & \dfrac{2\eta\left(dS_2\omega_3 - dS_3\omega_2\right)}{dS_1} & \dfrac{2\eta\left(dS_3\omega_1 - dS_1\omega_3\right)}{dS_1} & \dfrac{2\eta\left(dS_1\omega_2 - dS_2\omega_1\right)}{dS_1} \\ T_{20} & \dfrac{2\eta\left(dS_2\omega_3 - dS_3\omega_2\right)}{dS_2} & \dfrac{2\eta\left(dS_3\omega_1 - dS_1\omega_3\right)}{dS_2} & \dfrac{2\eta\left(dS_1\omega_2 - dS_2\omega_1\right)}{dS_2} \\ T_{30} & \dfrac{2\eta\left(dS_2\omega_3 - dS_3\omega_2\right)}{dS_3} & \dfrac{2\eta\left(dS_3\omega_1 - dS_1\omega_3\right)}{dS_3} & \dfrac{2\eta\left(dS_1\omega_2 - dS_2\omega_1\right)}{dS_3} \end{pmatrix}. \tag{42}$$

Тензор (42) – это тензор энергии-импульса в искривленном пространстве-времени. Для квантования тензора энергии-импульса прежде всего величину η выразим через планковские величины: планковскую длину $\left(\dfrac{\hbar k}{c^3}\right)^{\frac{1}{2}}$, планковское время $\left(\dfrac{\hbar k}{c^5}\right)^{\frac{1}{2}}$ и планковскую массу $\left(\dfrac{\hbar c}{k}\right)^{\frac{1}{2}}$. Вместо величины η будем использовать планковскую величину $\eta = \dfrac{\hbar}{\mathrm{V}}$, где V – нормировочный объем. Кроме того, нет причин предполагать площади в (42) различными, поэтому принимаем $dS_1 = dS_2 = dS_3$. В этом случае тензор (42) преобразуется к виду

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} \rho c^2 & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ T_{10} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_3 - \omega_2\right)}{\mathrm{V}} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_1 - \omega_3\right)}{\mathrm{V}} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_2 - \omega_1\right)}{\mathrm{V}} \\ T_{20} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_3 - \omega_2\right)}{\mathrm{V}} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_1 - \omega_3\right)}{\mathrm{V}} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_2 - \omega_1\right)}{\mathrm{V}} \\ T_{30} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_3 - \omega_2\right)}{\mathrm{V}} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_1 - \omega_3\right)}{\mathrm{V}} & \dfrac{2\hbar\left(\omega_2 - \omega_1\right)}{\mathrm{V}} \end{pmatrix}. \tag{43}$$

Рассмотрим, например, как выглядит тензор энергии-импульса при распространении гравитационного излучения в направлении оси X_1. Гравитационные волны – поперечные, следовательно, вектор циклической частоты направлен вдоль оси X_1. В этом случае формула (43) принимает вид

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} \rho c^2 & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ T_{10} & 0 & \dfrac{2\hbar\omega_1}{\mathrm{V}} & -\dfrac{2\hbar\omega_1}{\mathrm{V}} \\ T_{20} & 0 & \dfrac{2\hbar\omega_1}{\mathrm{V}} & -\dfrac{2\hbar\omega_1}{\mathrm{V}} \\ T_{30} & 0 & \dfrac{2\hbar\omega_1}{\mathrm{V}} & -\dfrac{2\hbar\omega_1}{\mathrm{V}} \end{pmatrix}. \qquad (44)$$

Несимметричность тензора энергии-импульса T_{ik} связана с принципиальным отказом от использования симметричного тензора напряжений [12, 13].

В тензор энергии-импульса входят компоненты $\pm\dfrac{2\hbar\omega_1}{\mathrm{V}} = \pm\varepsilon$, которые характеризуют объемную плотность энергии кванта гравитационного излучения, т. е. гравитон. Два знака спина отражают два направления поляризации: плюс – вектор циклической частоты ω_1 направлен вдоль направления распространения гравитона, минус – против направления распространения гравитона.

Несмотря на то, что мы ввели энергию гравитона в тензор энергии-импульса, это не означает, что тензор стал носить квантовый характер. Далее необходимо учесть идеи квантовой механики в матричной форме и добавить, по крайней мере, к тензорным компонентам с гравитационной энергией сомножитель $\exp\left(\dfrac{i}{\hbar}S\right) = \exp i\left(rX_1 - \omega_1 t\right)$ [15], где $S = \hbar\phi$ – квант гравитационного эйконала (35), $\phi = rX_1 - \omega_1 t$ – его фаза. Предполагаем функцию кванта гравитационного эйконала $S\left(X_1, t\right)$ достаточно близкой к линейной в слабом гравитационном поле.

В матричной форме квантовой механики ω_1 называется спектральной частотой и характеризует переход системы из одного квантового состояния в другое. Коэффициент $\exp\left(\dfrac{i}{\hbar}S\right)$ характеризует переход кванта гравитационного поля (гравитона) по квантовым состояниям в пространстве-времени. Заметим, что обычно при записи матриц в матричной форме квантовой механики экспоненциальные коэффициенты при компонентах матриц опускают [15]. Таким образом, тензор энергии-импульса получается в виде:

$$T_{ik}=\begin{pmatrix} \rho c^2 & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ T_{10} & 0 & \varepsilon\exp\left(\frac{i}{\hbar}S\right) & -\varepsilon\exp\left(\frac{i}{\hbar}S\right) \\ T_{20} & 0 & \varepsilon\exp\left(\frac{i}{\hbar}S\right) & -\varepsilon\exp\left(\frac{i}{\hbar}S\right) \\ T_{30} & 0 & \varepsilon\exp\left(\frac{i}{\hbar}S\right) & -\varepsilon\exp\left(\frac{i}{\hbar}S\right) \end{pmatrix}=$$

$$=\begin{pmatrix} \rho c^2 & T_{01} & T_{02} & T_{03} \\ T_{10} & 0 & \frac{2\hbar}{V}\exp i\left(rX_1-\omega_1 t\right) & -\frac{\hbar}{V}\exp i\left(rX_1-\omega_1 t\right) \\ T_{20} & 0 & \frac{2\hbar}{V}\exp i\left(rX_1-\omega_1 t\right) & -\frac{2\hbar}{V}\exp i\left(rX_1-\omega_1 t\right) \\ T_{30} & 0 & \frac{2\hbar}{V}\exp i\left(rX_1-\omega_1 t\right) & -\frac{\hbar}{V}\exp i\left(rX_1-\omega_1 t\right) \end{pmatrix}. \quad (45)$$

Тензор энергии- импульса (45) носит квантовый характер.

6. Уравнение гравитона

Для нахождения уравнения гравитона подставим тензор энергии-импульса (45) в уравнение Эйнштейна в форме (15). Шпур тензора энергии-импульса (45) имеет вид $T=\rho_g c^2$, где ρ_g – массовая плотность гравитона. Следовательно, уравнение (15) – уравнение гравитона – приобретает вид:

$$R_{ik}=\frac{8\pi k}{c^4}\left(T_{ik}-\frac{1}{2}g_{ik}\rho_g c^2\right). \quad (46)$$

Рассмотрим уравнение гравитона в почти плоском пространстве при отсутствии массовой компоненты в тензоре энергии импульса (45), т. е. при $T=\rho_g c^2=0$. Это связано с тем, что гравитоны практически не искривляют пространство-время. Предположение $T=\rho_g c^2=0$ является приближением. Гравитационное излучение, которое представляет собой совокупность гравитонов, обладает массой и энергией.

Учитывая сказанное, используем уравнение для волновых пульсаций метрического тензора h_{ik} в виде [6]

$$\frac{\partial^2 h_{ik}}{\partial X_\alpha \partial X_\alpha}-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 h_{ik}}{\partial t^2}=\frac{16\pi k}{c^4}T_{ik}. \quad (47)$$

Гравитационное излучение – поперечное, поэтому все компоненты тензора h_{ik} в уравнении (47) с индексами 1 при распространении гравитона в направлении X_1 исчезают. В тензоре h_{ik} остаются только компоненты h_{23} и $h_{22}=-h_{33}$ [10]. Заметим также, что в тензоре энергии-импульса (45) существует аналогичное соотношение, компоненты $T_{22}=-T_{33}$.

Для компоненты h_{23} волновое уравнение (47) приобретает вид

$$\frac{\partial^2 h_{23}}{\partial X_1^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 h_{23}}{\partial t^2} = -\frac{16\pi k}{c^4}\frac{2\hbar\omega}{\mathrm{V}}\exp i\left(rX_1 - \omega t\right). \qquad (48)$$

Для компоненты h_{22} знак в правой части уравнения положительный, а для компоненты h_{33} – отрицательный. Индекс 1 при частоте опускаем. Обозначив $\chi = h_{ik}\mathrm{V}$, где $ik = 22, 23, 33$, найдем:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial X_1^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = \pm\frac{32\pi k\hbar\omega}{c^4}\exp i\left(rX_1 - \omega t\right). \qquad (49)$$

Коэффициент перед экспонентой в правой части (49) пропорционален удвоенной скалярной кривизне пространства-времени (31) за счет присутствия гравитона $|R| = \frac{8\pi k}{c^4}\frac{E}{\mathrm{V}} = \frac{8\pi k}{c^4}\frac{2\hbar\omega}{\mathrm{V}}$. Этот коэффициент исключительно мал вследствие $\gamma = \frac{32\pi k\hbar}{c^4} = 0.87\cdot 10^{-74}\,см\cdot с$, что указывает на почти плоское пространство-время.

Будем полагать, что уравнение (49) описывает гравитационные волны и гравитон как квантовый эффект некоторой гравитационной волны, который распространяется в гравитационном поле другой излучающей гравитационные волны системы (рис. 2). Поэтому общее решение уравнения (49) будем искать в виде:

$$\chi = C_1 f_1\left(rX_1 - \delta t\right) + C_2 f_2\left(t\right)\exp irX_1, \qquad (50)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования;

$f_1\left(rX_1 - \delta t\right)$ и $f_2\left(t\right)$ – любые функции;

δ – частота гравитационной волны, связанная со скоростью ее распространения соотношением $r = \frac{\delta}{c}$. Частота δ определяется характеристиками излучающей системы (см. рис. 2 и [6]). Она не равна собственной частоте гравитона ω, который может принадлежать другой волне.

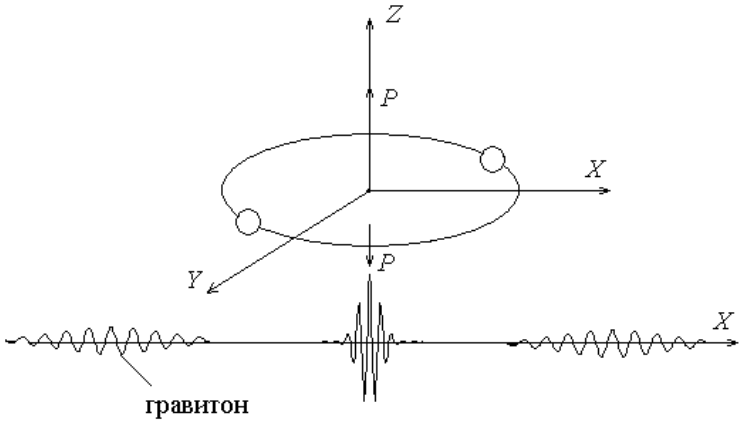


Рис. 2. Двойная звезда, излучающая гравитационные волны, и гравитон, пролетающий в поле двойной звезды

Первое слагаемое (50) описывает гравитационную волну, второе слагаемое – гравитон. Далее будем рассматривать в основном только гравитонное слагаемое.

Подставим (50) в уравнение (49), которое запишем в виде

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial X_1^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = \pm\gamma\omega \exp i\left(rX_1 - \omega t\right), \tag{51}$$

где $\gamma = \dfrac{32\pi k\hbar}{c^4}$ – постоянная величина.

Первое слагаемое (50) удовлетворяет уравнению (51) без правой части. Поэтому после подстановки мы получим:

$$\frac{d^2 f_2}{dt^2} + \delta^2 f_2 \pm \frac{\gamma\omega c^2}{C_2}\exp\left(-i\omega t\right) = 0. \tag{52}$$

Частное решение уравнения (52), зависящее от собственной частоты гравитона ω, будем искать в виде

$$f_2 = A\exp\left(-i\omega t\right). \tag{53}$$

Подставляя (53) в (52), найдем амплитуду:

$$A = \pm\frac{\gamma\omega c^2}{C_2\left(\omega^2 - \delta^2\right)}. \tag{54}$$

Следовательно, согласно (50) решение уравнения (51) для гравитона имеет вид

$$\chi = \pm\frac{\gamma\omega c^2}{\left(\omega^2 - \delta^2\right)}\exp i\left(rX_1 - \omega t\right). \tag{55}$$

Учитывая обозначение $\chi = h_{ik}\mathrm{V}$, где $ik = 22, 23, 33$, а также $\gamma = \dfrac{32\pi k\hbar}{c^4}$ и (31), найдем:

$$h_{ik} = \mp\frac{32\pi k\hbar\omega e_{ik}}{c^2\left(\delta^2 - \omega^2\right)\mathrm{V}}\exp i\left(rX_1 - \omega t\right) = \pm\frac{2Rc^2 e_{ik}}{\left(\delta^2 - \omega^2\right)}\exp i\left(rX_1 - \omega t\right), \tag{56}$$

где $\boldsymbol{r}$ – волновой вектор гравитона в направлении его распространения;

e_{ik} – единичный тензор поляризации гравитона, подчиняющийся условиям [16]:

$$e_{ik} = e_{ki}, \qquad e_{ii} = 0, \qquad k_i e_{ik} = 0, \qquad e_{ik}e_{ik} = 1. \tag{57}$$

В отличие от электромагнитной волны, поляризация которой определяется вектором колебаний электрического поля, поляризация гравитона (и гравитационной волны) имеет принципиально тензорный характер. Третье условие (57) есть условие поперечности гравитонов (и гравитационных волн).

Верхний знак (55) и (56) соответствует величине h_{22}, а нижний знак – h_{23} и h_{33}. Величина h_{ik}, естественно, не зависит от нормировочного объема V.

Объемную плотность энергии системы массовая частица – гравитационное поле $w = T + U$ в соответствии с (22) можно записать в виде

$$w=(\rho-\rho_0)c^2+(\rho\varphi_g-l_g)=(\rho-\rho_0)c^2+\left(\rho k\frac{M}{r}-\frac{c^4}{16\pi k}R\right), \quad (58)$$

где $\varphi_g=k\frac{M}{r}$ – потенциал массы M, создающей гравитационное поле;

r – расстояние от массового центра.

Использован знак плюс для потенциала, чтобы удовлетворялась формула $f=-\frac{\partial(\rho\varphi_g)}{\partial r}$ связи между положительной гравитационной силой и потенциальной энергией.

Учитывая $R=-\frac{8\pi k}{c^4}T$ (14) или [6], где T – шпур тензора энергии-импульса, найдем:

$$w=(\rho-\rho_0)c^2+\left(\rho k\frac{M}{r}+\frac{T}{2}\right)=(\rho-\rho_0)c^2+\left(\rho k\frac{M}{r}+\frac{\rho_g c^2}{2}\right), \quad (59)$$

где $T=\rho_g c^2$, а величину ρ_g можно интерпретировать как массовую плотность гравитационного поля. Это может быть темная энергия космического пространства [17]. Вероятно, темная энергия гравитационного поля представляет собой всю совокупность гравитонов космического пространства.

7. Регистрация гравитона

Вид функции (56) позволяет сделать некоторые заключения. Вдали от массивного тела гравитон как квантовый эффект практически незаметен. Квантовые свойства практически не влияют на регистрацию гравитационных волн.

Однако функция (56) имеет интересную особенность. Рассмотрим ситуацию $\omega\to\delta$, т. е. приближения собственной частоты подлетающего из космического пространства гравитона к частоте гравитационной волны излучающей системы, которая определяется свойствами этой системы (см. рис. 2). Это приближение определяется формулой, аналогичной (6) для гравитона. Пульсационный компонент метрического тензора h_{ik} гравитона (который излучился иной системой) стремится к бесконечности. Наблюдается резонанс частоты гравитационной волны и собственной частоты гравитона, который находится в составе иной волны (см. рис. 2). Это явление может быть использовано для регистрации гравитонов.

Предположим, что два массивных космических тела (например, двойная звезда, см. рис. 2) вращаются вокруг общего центра масс. Эта система излучает гравитационные волны $h_{ik}=ae_{ik}\cos(rX_1-\delta t)$ с амплитудой a и постоянной частотой δ [6]. Если гравитон как квантовый эффект другой волны попадает в область таких космических тел, то его собственная частота ω растет согласно формуле (6) подобно частоте фотона. В соответствии с формулой (56) рост энергии гравитона происходит много быстрее $2\hbar\omega$, что указывает на резонансную перекачку энергии гравитационного поля через гравитационное излучение в гравитон. Энергия гравитона становится очень большой, и гравитон может быть зарегистрирован. Возможно, для этой цели будет необходимо установить детектор на массивное тело или вблизи него (на планету или искусственный спутник).

С помощью такого детектора можно зарегистрировать аномальный всплеск гравитации при прохождении гравитона.

При удалении от системы тел (см. рис. 2) гравитон возвращает энергию гравитационному полю системы тел, его частота падает (по типу красного смещения в гравитации). Поэтому энергия гравитационного поля массивных тел не изменяется при пролете около них гравитонов.

Заключение

На основе уравнения Эйнштейна для гравитации исследовано гравитационное излучение массивных тел. Записан лагранжиан системы гравитационное поле – массовая частица. Исследовано уравнение Эйнштейна с учетом космологической постоянной, которая определяет кривизну пространства гравитационного вакуума. Проведено квантование гравитационного поля двумя способами. В первом способе использована концепция кванта гравитационного эйконала. Найденная энергия отдельного гравитона оказалась пропорциональной его частоте, которая, в свою очередь, пропорциональна массе гравитона. Во втором способе на основе отказа от симметричного тензора напряжений в тензоре энергии-импульса уравнения Эйнштейна, замены соответствующих компонент силовыми величинами также найдена энергия гравитона. Оба способа нахождения энергии отдельного гравитона дали одинаковый результат.

Решение квантового уравнения Эйнштейна в определенном направлении показывает, что это решение представляет собой сумму двух слагаемых, первое из которых характеризует гравитационные волны, а второе – гравитон.

При приближении гравитонов к двойной звезде происходит резонансная перекачка энергии гравитационного поля системы массивных тел через гравитационное излучение этой системы в гравитоны, прилетающие извне, что увеличивает их массу и частоту. Это позволяет регистрировать гравитоны. При удалении гравитонов от двойной звезды их энергия возвращается обратно в гравитационное поле звезды. Частота гравитонов уменьшается по типу красного смещения для гравитации. Поэтому в целом гравитоны как квантовый эффект не влияют на гравитационное поле звезд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бронштейн М.П.* Квантование гравитационных волн // ЖЭТФ. – 1936. – 6. – С. 195–236.
2. *Wheeler J.A.* Geons. Phys. Rev. 97. 1955. Pp. 511–536.
3. *Kiefer C.* Quantum Gravity. New York: Oxford Univ. Press, 2004. 308 p.
4. *Рубаков В.А., Тиняков П.Г.* Модификация гравитации на больших расстояниях и массивный гравитон // УФН. – 2008. – 178, 8. – С. 785–822.
5. *Corda C.* Interferometric Detection of Gravitational Waves: the Definitive Test for General Relativity // Int. J. of Modern Physics D. Vol. 18, No. 14. 2009. Pp. 2275–2282.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. – М.: Наука, 1967. – 460 с.
7. *Калуца Т.* К проблеме единства физики // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – С. 529–534.
8. *Pardo K., Fishbach M., Holz D.E., Spergel D.N.* Limits on the Number Spacetime Dimensions from GW170817 // ArXiv.org 1801.08160v1, 24 Jan 2018. Pp. 1–7.
9. *Фрадкин Е.С.* Метод функции Грина в теории квантовых полей и квантовой статистике // Труды ФИАН. 29. – М.: Наука, 1965. – С. 7–138.
10. *Зельдович Я.Б., Новиков И.Л.* Теория тяготения и эволюция звезд. – М.: Наука, 1971. – 484 с.
11. *Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А.* Курс теоретической физики. Т. 2. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 820 с.
12. *Волобуев А.Н.* Основы несимметричной гидромеханики. – Самара: СамЛюксПринт, 2011. – 188 с.

13. *Волобуев А.Н.* Вектор и тензор напряжений Рейнольдса // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23. № 8. – С. 127–136.
14. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. Пер. с нем. – М.: Наука, 1974. – С. 63.
15. *Мотт Н., Снеддон И.* Волновая механика и ее применения. Пер. с англ. – М.: КомКнига, 2007. – С. 389.
16. *Peters P.C., Mathews J.* Gravitational Radiation from Point Masses in a Keplerian Orbit // Phys. Rev. 131. 1. 1963. pp. 435–440.
17. *Лукаш В.Н., Рубаков В.А.* Темная энергия: мифы и реальность // УФН. – 2008. – 178, 3. – С. 301–308.

Статья поступила в редакцию 11 июня 2020 г.

SOME FEATURES OF AN INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION QUANTUMS WITH A GRAVITATIONAL FIELD AND A PROBLEM OF GRAVITON

A.N. Volobuev[1], A.M. Shterenberg[2], P.K. Kuznetsov[3]

[1] Samara State Medical University
89, Chapaevskaya st., Samara, 443099, Russian Federation

[2] Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The problems connected to propagation of a gravitational field are considered. The law of electromagnetic radiation frequency change in gravitational field is shown. The problem of a gravitational field quantization is investigated. Energy of a graviton is found by two ways. First, on the basis of use quantum gravitational eikonal and Lagrangian of a gravitational field the energy of a solitary graviton is found. It is shown that graviton has the mass proportional to its frequency. Second, due to refusal from symmetric stresses tensor in structure of an energy-impulse tensor the quantum form of the energy-impulse tensor in Einstein's equation is found. It has allowed found the energy of a solitary graviton. Both ways of an energy graviton finding has given the identical result. It is shown that the solution of the Einstein's equation with use of the quantum form of an energy-impulse tensor for the certain direction represents the sum of a gravitational wave and a graviton. It is found out that at approach of a graviton to the massive bodies (double stars) radiating gravitational waves there is a resonant pumping of the gravitational field energy of these bodies to the gravitons with increase in their mass and frequency. It enables registration of the gravitons with the help of the detector located near to massive bodies. The assumption is made that dark energy of a gravitational field is all set of the graviton energies of a space.*

Keywords: *electromagnetic radiation, gravitational eikonal, metric tensor, Einstein's equation, gravitational waves, energy-impulse tensor, registration of gravitons.*

REFERENCES

1. *Bronstein M.P.* Quantization of gravitational waves. ZhETF. 6.1936.S. 195–236.
2. *Wheeler J.A.* Geons. Phys. Rev. 97. 1955. Pp. 511–536.

Andrey N. Volobuev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksandr M. Shterenberg (Dr. Sci. (Phys.& Math.)), Professor.
Pavel K. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

3. *Kiefer C.* Quantum Gravity. New York: Oxford Univ. Press, 2004. 308 p.
4. *Rubakov V.A., Tinyakov P.G.* Modification of gravity at large distances and a massive graviton // Phys. 178, 8. 2008.S. 785–822.
5. *Corda C.* Interferometric Detection of Gravitational Waves: the Definitive Test for General Relativity // Int. J. of Modern Physics D. Vol. 18, No. 14. 2009. Pp. 2275–2282.
6. *Landau L.D., Lifshits E.M.* Field theory. Moscow: Nauka, 1967. 460 p.
7. *Kaluza T.* On the problem of the unity of physics. B Sat. Albert Einstein and the theory of gravity. M.: Mir, 1979. S. 529–534.
8. *Pardo K., Fishbach M., Holz D.E., Spergel D.N.* Limits on the Number Spacetime Dimensions from GW170817 // ArXiv.org 1801.08160v1, 24 Jan 2018. Pp. 1–7.
9. *Fradkin E.S.* Green's function method in the theory of quantum fields and quantum statistics. Proceedings of FIAN. 29. M.: Nauka, 1965. S. 7–138.
10. *Zeldovich Ya.B., Novikov I.L.* The theory of gravitation and the evolution of stars. Moscow: Nauka, 1971. 484 p.
11. *Levich V.G., Vdovin Yu.A., Myamlin V.A.* Theoretical physics course. T. 2. M.: FIZMATGIZ, 1962. 820 p.
12. *Volobuev A.N.* Fundamentals of asymmetric fluid mechanics. Samara: SamLuxPrint LLC, 2011. 188 p.
13. *Volobuev A.N.* Reynolds stress vector and tensor // Mathematical modeling. 2011. Vol. 23. No. 8. P. 127–136.
14. *Schlichting G.* Theory of the boundary layer. Per. with him. Moscow: Nauka, 1974. S. 63.
15. *Mott N.F., Sneddon I.N.* Wave mechanics and its applications. Per. from English. M.: KomKniga, 2007. S. 389.
16. *Peters P.C., Mathews J.* Gravitational Radiation from Point Masses in a Keplerian Orbit // Phys. Rev. 131.1.1963. pp. 435–440.
17. *Lukash V.N., Rubakov V.A*. Dark Energy: Myths and Reality // UFN. 178, 3. 2008. pp. 301–308.

doi: 10.14498/tech.2020.3.7

УДК 621.365.511

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА*

А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин, С.С. Кибкало, Д.В. Сурков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aidanilushkin@mail.ru, denis.zhivotyagin@arconic.com, vaz-21093-2001@yandex.ru, surkov81dv@mail.ru

Аннотация. *Рассматриваются вопросы проектирования высокопроизводительной индукционной установки для нагрева ферромагнитных заготовок перед обработкой на деформирующем оборудовании. Отмечены специфические особенности технологического процесса нагрева ферромагнитных заготовок до температур пластической деформации. Показано, что для повышения эффективности процесса нагрев крупногабаритных заготовок из ферромагнитной стали целесообразно осуществлять в двухчастотном индукционном нагревателе с двумя автономными секциями. Выполнено исследование процесса нагрева в двухсекционном нагревателе ферромагнитных заготовок с учетом нелинейной зависимости физических характеристик металла нагреваемых заготовок от изменяющейся в процессе нагрева температуры. Сформулирована и решена задача минимизации длины двухсекционного нагревателя с учетом энергетических и технологических ограничений. Условием для определения оптимальной длины первой секции является достижение температуры, соответствующей потере магнитных свойств, в слое, равном глубине проникновения тока на частоте источника питания второй секции. Представлены результаты численного расчета оптимальных параметров двухсекционного нагревателя. Показано, что алгоритм распределения мощности по длине двухсекционного нагревателя представляет собой кусочно-постоянную функцию. Приведены результаты расчета температурного распределения в заготовках в процессе нагрева. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для решения задачи оптимизации конструктивных и режимных параметров многосекционного нагревателя.*

Ключевые слова: *индукционный нагрев, частота, математическая модель, температурное распределение, оптимальное проектирование.*

Нагрев заготовок в технологических линиях производства изделий методом штамповки или прессования на машиностроительных и металлургических предприятиях производят преимущественно в высокопроизводительных индукцион-

** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А.*

Данилушкин Александр Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».
Животягин Денис Александрович, аспирант.
Кибкало Сергей Сергеевич, аспирант.
Сурков Дмитрий Викторович, аспирант.

ных нагревательных установках методического действия, состоящих из нескольких секций. При этом используются два возможных варианта питания нагревателя: все секции индукционной установки подключают к одному источнику питания или нагрев осуществляют в двухчастотном нагревателе. Во втором случае секции индукционного нагревателя работают на разных частотах, следовательно, используются два независимых источника. Этот способ целесообразно использовать при нагреве крупногабаритных ферромагнитных заготовок под обработку на деформирующем оборудовании [1–4]. Известно, что эффективность индукционного нагревателя при нагреве ферромагнитных заготовок до температур пластической деформации значительно снижается при потере металлом магнитных свойств. Уменьшается коэффициент полезного действия, снижается коэффициент мощности установки [5–9]. Температура, при которой металл теряет магнитные свойства, в зависимости от марки стали лежит в диапазоне 650÷700 град. Для повышения эффективности нагрева и улучшения энергетических характеристик индуктора нагрев крупногабаритных заготовок целесообразно осуществлять на двух частотах: нагрев до температуры магнитных превращений осуществлять на одной частоте, определенной из условия максимальной энергетической эффективности нагревателя, а затем, при нагреве немагнитного металла, переходить на нагрев на более высокой частоте. Конкретное значение частоты определяется на основании известных соотношений для сквозного нагрева немагнитных заготовок [10].

Сложность исследования процесса нагрева в индукционной системе при обработке ферромагнитных заготовок заключается в необходимости учета нелинейной зависимости физических характеристик материала нагреваемых заготовок от изменяющейся в процессе нагрева температуры. При переходе через точку Кюри металл теряет магнитные свойства. Это приводит к значительному изменению электрических параметров индукционного нагревателя при высокотемпературном нагреве ферромагнитных заготовок [10, 11].

Методика расчета температурного распределения при индукционном нагреве основана на решении нелинейной взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями [12–14]:

$$\frac{\partial\left(\mu_a\left(H(r,x,t),T\right)H(r,x,t)\right)}{\partial t}-\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{1}{\sigma(T)}\frac{\partial H(r,x,t)}{\partial r}\right)-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\sigma(T)}\frac{\partial H(r,x,t)}{\partial x}\right)=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial H(0,x,\tau)}{\partial r}=0 \qquad (2)$$

$$c(T)\gamma\frac{\partial T(r,x,t)}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T)r\frac{\partial T(r,x,t)}{\partial r}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(r,x,t)}{\partial x}\right)+\frac{1}{c(T)\gamma}W\left(r,x,t,\xi(T)\right) \qquad (4)$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T(r,x,t)}{\partial t}\bigg|_{x=0}==\alpha\left[T(r,0,t)-T_1(r,0,t)\right]+\varepsilon\left[\left(\frac{T(r,0,\tau)}{100}\right)^4-\left(\frac{T_1(r,0,t)}{100}\right)^4\right] \qquad (5)$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T(r,L,t)}{\partial t}\bigg|_{x=L}=\alpha[T(r,L,t)-T_2(r,L,t)]+\varepsilon\left[\left(\frac{T(r,L,\tau)}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2(r,L,t)}{100}\right)^4\right] \quad (6)$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T(r,x,t)}{\partial t}\bigg|_{r=R}=\alpha_1(T)[T(R,x,t)-T_1(\mathrm{R}_1,x,t)]+\varepsilon_1\left[\left(\frac{T(R,x,t)}{100}\right)^4-\left(\frac{T_1(R,x,t)}{100}\right)^4\right] \quad (7)$$

$$T(r,x,0)=T_0(r,x);\ r\in[0,R];\ x\in[0,L] \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(0,x,t)}{\partial r}=0 \quad (9)$$

Здесь $\{\overline{H}\}$ – вектор напряженности магнитного поля;

T – температура;

t – время;

$\lambda(r,x,T)$– удельная теплопроводность;

$c(T)$ – удельная теплоемкость;

γ – плотность нагреваемого металла;

$W(r,x,t,\xi(T))$ – удельная мощность тепловыделения;

$\xi(T)$ – глубина проникновения тока.

Система уравнений (1), (2) дополняется граничными условиями. Для электромагнитной задачи используются условия равенства функции нулю на бесконечно удаленной границе S_1 (ГУ1) и условие симметрии на осевой линии S_2, которое заключается в равенстве нулю производной от функции (ГУ2).

Задача расчета внутренних источников тепла формулируется на основе уравнений Максвелла для векторного магнитного потенциала A ($B=rotA$) и скалярного электрического потенциала U ($\mathbf{E}=-\mathrm{grad}\,U$, E – вектор напряженности электрического поля) [12]:

$$rot\left(\mu^{-1}\cdot rotA\right)=J+rotH;$$
$$J=g\cdot gradU-g\cdot\partial A/\partial t,$$

где μ^{-1} – тензор, обратный тензору магнитной проницаемости;

g – электропроводность.

Задача формулируется как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A ($B=rotA$, B – вектор магнитной индукции) для осесимметричного случая

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r\mu_x}\frac{\partial A}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu_r}\frac{\partial A}{\partial x}\right)-i\omega gA=-j_{стор},$$

где электропроводность g и составляющие магнитной проницаемости μ_x и μ_r постоянны в переделах каждого блока модели. Сторонняя составляющая тока $J_{стор}$ предполагается обратно пропорциональной радиусу.

Мощность внутренних источников тепла, характеризующих нагрев проводящих тел индукционной системы, вычисляется для каждого элемента по закону

Джоуля – Ленца:

$$P^{(e)} = \frac{1}{2}\int_{V^e} \sigma\left(\overline{E}\cdot\overset{*}{E}\right)dV,$$

где $\overset{*}{E}$ – величина, сопряженная к $\overline{E}$.

Для учета нелинейной зависимости $\mu_a(H)$ в ферромагнитных областях разработан итерационный алгоритм многократного решения результирующей системы уравнений. Определение магнитной проницаемости производится с помощью введения в программу расчета полинома, аппроксимирующего кривую намагничивания.

Для решения электромагнитной задачи выбран тип задачи магнитного поля переменных токов. Анализ магнитного поля переменных токов состоит в расчете электрического и магнитного полей, возбужденных приложенными переменными (синусоидально изменяющимися во времени) токами или внешним переменным полем. По заданным исходным данным строится геометрия модели. Исследуемая индукционная установка представляет собой осесимметричную систему. Построение модели начинается с задания осей симметрии и ориентации модели в пространстве.

Основные элементы модели строятся с помощью единичных геометрических объектов. Точки задаются координатами и соединяются линиями, образуя поверхности. Завершается построение геометрии заданием конечной области, ограничивающей пространство модели. Следующий шаг моделирования заключается в создании расчетной сетки модели, где каждую составляющую конструкции индукционной системы разбивают на простейшие элементы. Тип элементов и способ разбиения зависят от индивидуальных особенностей задачи, конфигурации деталей и координат областей конструкции, оказывающих наибольшее влияние на результат решения задачи.

При построении сетки наибольший интерес представляет поведение электромагнитного поля в непосредственной близости к загрузке и катушке индуктора. В этих областях плотность сетки должна быть максимальной. Плотность сетки можно уменьшать по мере удаления к границе области. В настоящей работе для разбиения исследуемого пространства выбран треугольный тип элементов. Сетка моделируемой системы «индуктор – загрузка» строится с учетом поверхностного эффекта. С этой целью в каждой заготовке и на поверхности индуктора, обращенной к заготовке, задается область, геометрические размеры которой зависят от глубины проникновения тока в металл. Специфической особенностью исследуемого процесса является переход нагреваемой заготовки через точку магнитных превращений, причем этот переход имеет место в первой секции индуктора, работающей на частоте 50 Гц. В этом случае наблюдается ярко выраженный поверхностный эффект, поэтому в этой области строится равномерная сетка с минимально возможными размерами треугольного элемента. Кроме того, сгущение сетки предусмотрено в области стыка смежных заготовок.

Вся расчетная конструкция модели состоит из несколько частей, включающих N заготовок, одновременно находящихся в нагревателе, катушки индуктора, тепловую изоляцию и окружающее пространство. Нелинейные зависимости магнитной проницаемости, теплоемкости, удельной проводимости, теплопроводности от температуры задаются вручную с помощью аппроксимирующих выражений.

Для тепловой задачи задаются граничные условия на боковых поверхностях и на торцах смежных заготовок, для каждой заготовки задаются коэффициенты конвективного теплообмена и теплообмена излучением. Электрофизические и теплофизические свойства материала загрузки задаются в виде непрерывных или табличных функций, зависящих от температуры. ELCUT позволяет вести вычисления с учетом нелинейных зависимостей свойств материалов от температуры. Для первой секции индуктора, где материал загрузки сохраняет магнитные свойства, необходимо ввести аппроксимирующую зависимость магнитной проницаемости от интенсивности магнитного поля. В этом случае используется специально модифицированная кривая намагничивания ферромагнитного материала. Автоматический пересчет кривой намагничивания $B(H)$ выполняется с таким расчетом, чтобы сохранялась средняя энергия магнитного поля за период. Редактор кривой намагничивания для данного типа задач показывает одновременно исходную и скорректированную кривые.

Теплопроводность задается линейной зависимостью вида

$$\lambda(T) = \lambda_0 (1 + (T - T_0)),$$

где T_0 – начальная температура;

λ_0 – теплопроводность при нулевой температуре.

Удельное сопротивление

$$\rho(T) = \rho_0 (1 + (T - T_0)),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при нулевой температуре.

Объемная теплоёмкость задается в виде экспоненциальной зависимости.

Объемная теплоемкость задается в виде экспоненциальной зависимости.

Особенностью решения электромагнитной задачи является необходимость учитывать зависимость магнитной проницаемости материала заготовки от температуры. В используемом пакете ELCUT нет возможности автоматизированной реализации этой зависимости, поэтому решение тепловой задачи для заготовки проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения по мере прогрева слоев заготовки выше точки магнитных превращений и заданием полученной картины в качестве источников для тепловой задачи. Таким образом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры и внутренних источников тепловыделения. Итерации проводятся до получения заданной технологией температуры.

По результатам моделирования получены значения параметров электромагнитного поля, характеризующих рассматриваемый процесс: распределение напряженности магнитного поля, распределение плотности полного тока в каждой заготовке, распределение мощности внутренних источников тепловыделения, распределение плотности потока энергии по сечению каждой заготовки, зависимость изменения мощности во времени для каждой заготовки и в секциях нагревателя, изменение мощности по длине каждой секции нагревателя, температурные распределения по радиальной и осевой координатам и др.

На рис. 1 приведена сетка конечных элементов для расчета электромагнитных полей в первой секции нагревателя. Характеристика КЭ модели: число уз-

лов – 3804, число элементов – 7489.

Полученные в результате численного расчета электромагнитной задачи внутренние источники тепла используются далее при решении задачи расчета температурного поля заготовки в процессе ее дискретного перемещения через нагреватель.

Специфической особенностью расчета температурного поля заготовок является существенно различающиеся по характеру функции распределения внутренних источников тепла в секциях нагревателя и различные условия теплообмена по длине загрузки. В первой секции нагревателя находятся ферромагнитные заготовки, поэтому характер распределения внутренних источников тепла в значительной степени определяется нелинейной зависимостью мощности внутреннего тепловыделения от напряженности магнитного поля. Во второй секции заготовка немагнитная и характер распределения плотности тока по сечению заготовки однозначно определяется частотой источника питания и удельным сопротивлением нагреваемого металла.

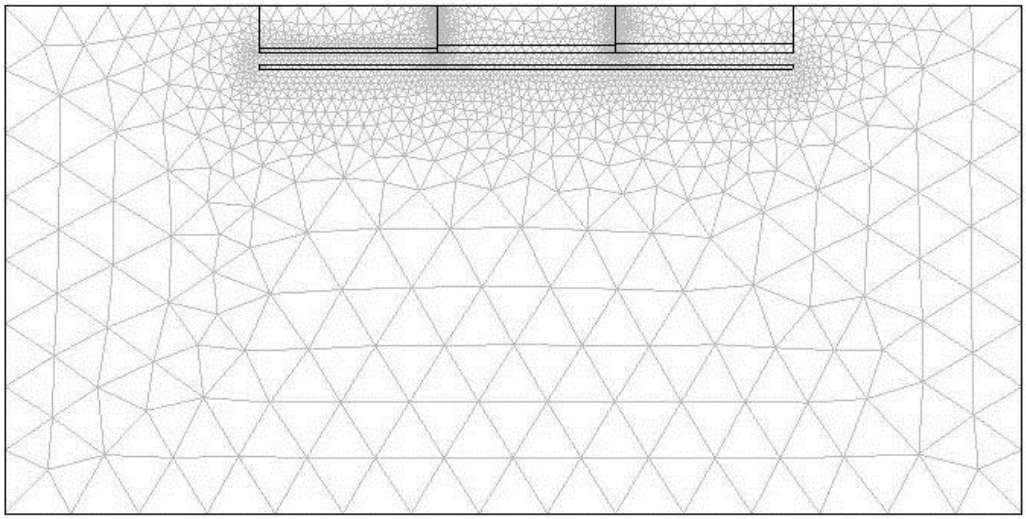


Рис. 1. Сетка конечных элементов секции нагревателя
для расчета электромагнитных полей

Решение тепловой задачи для заготовок, находящихся в нагревателе, проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения в электромагнитной задаче и заданием полученной картины в качестве источников для тепловой задачи [15–17]. Таким образом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры и внутренних источников тепловыделения.

Для решения тепловой задачи используется приложение программы Comsol, построенное на базе метода конечных элементов. Распределение температуры в нагреваемой заготовке находится в результате решения уравнения теплопроводности с известной функцией распределения внутренних источников тепла, полученной в результате решения электромагнитной задачи.

Предложенная методика расчета положена в основу проектирования индукционного нагревателя минимальной длины. Задача минимизации длины индукционного нагревателя решается с учетом ряда конструктивных и режимных фак-

торов при наличии энергетических и технологических ограничений, накладываемых источниками питания и технологией. В качестве ограничений рассматриваются удельная мощность нагрева, максимальная температура нагрева, перепад температур по объему изделия, скорость нагрева.

Задача на минимум длины двухчастотного нагревателя формулируется следующим образом [19].

Для объекта, описываемого уравнениями вида (1)–(9), требуется определить минимальную длину двухсекционного нагревателя, при которой в установившемся режиме обеспечивается заданное технологией температурное распределение по объему заготовки на выходе из нагревателя

$$T(r,x,t)=T_{зад}(r,x)\pm\Delta T_{\text{доп.}}$$

при наличии энергетических и технологических ограничений вида:

– удельная поверхностная мощность первой секции индуктора

$$0\le p_1\le p_{1\max}\ ,\text{кВт/м}^2;$$

– удельная поверхностная мощность второй секции индуктора

$$0\le p_2\le p_{2\max}\ ,\text{кВт/м}^2;$$

– максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) $(T_{пов}-T_ц)_I\le\Delta T_1,°C$;

– максимальная температура наиболее нагретой точки по сечению

$$T(r,x,\tau_{кон})\le T_{\max},\ ^\circ C;$$

– перепад температур между наиболее нагретой точкой и центром заготовки на выходе из нагревателя – $(T_{\max}-T_ц)=\Delta T_{доп}$.

Максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) и предельное значение температуры поверхности заготовки на выходе из первой секции индуктора определяются технологическими требованиями.

Варьируемые параметры:

1. Частота питающего напряжения.
2. Удельная мощность нагрева по длине первой секции нагревателя

$$0\le p_1\le p_{1\max}\ ,\text{кВт/м}^2.$$

3. Удельная мощность нагрева по длине второй секции нагревателя

$$0\le p_2\le p_{2\max}\ ,\text{кВт/м}^2.$$

В качестве начальных условий принимается радиальное температурное распределение заготовки, находящейся на входе в первую секцию. Точность приближения результирующего температурного распределения к требуемому оценивается по величине максимального отклонения температуры по объему нагреваемой заготовки на выходе из нагревателя.

Как правило, если нет специальных требований к характеристикам индукционного нагревателя, выбор оптимальной частоты определяется условиями максимального электрического КПД, максимального коэффициента мощности и минимально возможным временем нагрева до заданной температуры, что для мето-

дического нагревателя аналогично конструкции нагревателя с минимальной длиной. Значение предельного электрического КПД может быть получено на основании известных зависимостей [10, 12] либо серии экспериментов, проведенных для нескольких частот при одинаковых геометрических размерах индукционной системы.

Оптимальное по критерию минимума длины нагревателя распределение мощности нагрева по длине нагревателя с учетом ограничения на температуру поверхности заготовки состоит из двух интервалов. На первом интервале нагрев осуществляется при максимально допустимой удельной поверхностной мощности. Исходя из этого предположения определяют длину первой секции. Необходимым условием при поиске длины первой секции является достижение температурой металла в точке, соответствующей глубине проникновения тока на частоте второй секции, значения, при котором металл теряет магнитные свойства. Частота тока во второй секции нагревателя определяется по известным соотношениям для сквозного нагрева немагнитной стали [10].

Для реализации методики оптимального проектирования индукционного нагревателя разработан алгоритм последовательного решения задачи оптимизации с улучшением требуемых показателей на каждой итерации.

В процессе поиска оптимума на каждой итерации происходит пересчет электромагнитной задачи из-за уточнения распределения температуры по радиусу и длине нагревателя. Процесс заканчивается, если полученное температурное распределение и оптимизируемые параметры – длины каждой секции нагревателя – оказываются близкими к их значениям на предыдущем этапе.

Задача поиска состоит в определении длины участков и уровня мощности с учетом накладываемых технологических, энергетических и конструктивных ограничений.

После проверки полученных результатов на соответствие накладываемым ограничениям решение считается завершенным. Далее производится расчет интегральных параметров системы: расчет и выбор числа витков и сечения проводов катушки обоих индукторов в соответствии с выбранной частотой и напряжением источника питания и расчет системы охлаждения по известной методике [20].

В индукционных нагревательных установках методического действия заготовки перемещаются дискретно [21–23]. В нагревателе одновременно находятся N заготовок, причем количество заготовок в каждой секции двухчастотного нагревателя может отличаться. Это обусловлено различными причинами, прежде всего наличием разных по уровню предельных значений удельной мощности нагрева для секций, работающих на различных частотах.

Решение задачи оптимизации длины нагревателя по приведенной методике рассмотрено на конкретном примере двухсекционного индукционного нагревателя методического действия для нагрева мерных стальных ферромагнитных заготовок до температур пластической деформации.

В работе выполнены расчеты параметров нагревателей для исходных данных, представленных в табл. 1.

Технологические требования к режиму нагрева [24]:

– на выходе из нагревателя средняя температура заготовки T=1180±70 C°;

– удельная поверхностная мощность $0 \le p_{2\max} \le 2500$ кВт/м^2;

– максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) $\left(T_{пов} - T_{ц}\right)_I \le 600°C$;

– максимальная температура наиболее нагретой точки по сечению заготовки $T_{\max}(r,x,\tau) \le 1250^{\circ}C$.

Таблица 1

Параметры нагреваемых заготовок

Наименование детали	Материал детали	Диаметр D, мм	Длина L, мм	Масса m, кг	Производительность П, кг/час
Заготовка для нагрева под обработку на деформирующем оборудовании	Ст19ХГНМА Ст14ХН3МА	120÷160	350	30÷56	3000

В табл. 2 приведены результаты расчета параметров нагревателей различного конструктивного исполнения – односекционного нагревателя с рабочей чатотой 1000 Гц, двухсекционного двухчастотного нагревателя с частотами соответственно 50 и 1000 Гц и нагревателя оптимальной конструкции с рабочими частотами 500 и 2400 Гц в секциях.

Таблица 2

Сравнительные характеристики нагревателей

Параметр	Одночастотный индуктор	Двухчастотный индуктор		Двухчастотный индуктор минимальной длины	
		1-я секция	2-я секция	1-я секция	2-я секция
Частота, Гц	1000	50	1000	500	2400
Длина секции, м	3,2	1,15	1,75	1,15	1,15
Общая длина, м	3,2	2.9		2.3	
Число заготовок	10	8		6	
Диаметр, м	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
U, В	800	380	800	800	800
P, кВт	543	239,4	289,5	219,4	270,7
$\eta_{эл.}$	0,718	0,72	0,74	0,76	0,78
$\eta_{m.}$	0,803	0,835	0,84	0,852	0,86
$\eta_{\Sigma.}$	0,576	0,61	0,62	0,647	0,671
$\cos\varphi$	0,107	0,26	0,083	0,092	0,067

Полученный алгоритм распределения мощности по длине двухсекционного нагревателя представляет собой двухинтервальную кусочно-постоянную функцию. Уровень мощности для каждой секции рассчитывается исходя из условия обеспечения технологического ограничения на температуру по объему заготовки в конце нагрева, т. е. сводится к выполнению условия

$$T_{\max}\left(r_{\max}, x_{\max}, t\right) \le T_{доп},$$

где $r_{\max}, x_{\max}$ – координаты точки с максимальной температурой.

Приведенные в качестве примера результаты получены для технологии, по которой допустимая точность нагрева составляет 150 град. При повышении точности нагрева алгоритм расчета мощности в секциях нагревателя остается неизменным, но одновременно увеличивается длина второй секции (количество заготовок во второй секции) и мощность каждой секции.

Результаты расчета температурного распределения в загрузке при минимальной длине нагревательной системы приведены на рис. 1÷4.

На рис. 2 и рис. 4 приведены графики радиального распределения температуры через каждые 20 сек в процессе нагрева заготовки на последней позиции. Как следует из графиков, координата точки с максимальной температурой находится внутри заготовки. Ее координата определяется величиной тепловых потерь с поверхности загрузки. С уменьшением потерь она приближается к поверхности. На рис. 3 и рис. 5 приведены графики аксиального распределения температуры в секциях в различных точках по радиусу заготовок.

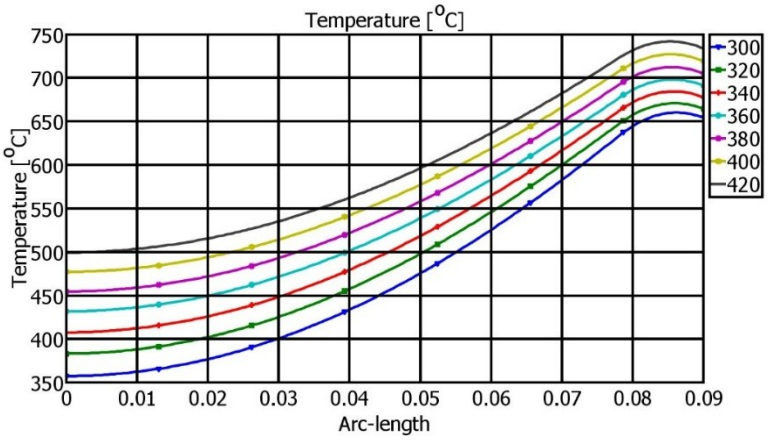


Рис. 2. Графики радиального распределения температуры в заготовке на выходе первой секции

На интенсивность нагрева существенное влияние оказывают физические свойства металла, изменяющиеся в процессе нагрева. С ростом температуры увеличивается удельное сопротивление металла, изменяется напряженность магнитного поля и магнитная проницаемость. Влияние этих характеристик отражается на мощности, выделяющейся в каждой заготовке. Характер распределения мощности тепловыделения в заготовках по длине загрузки при постоянной мощности секций представлен на рис. 6.

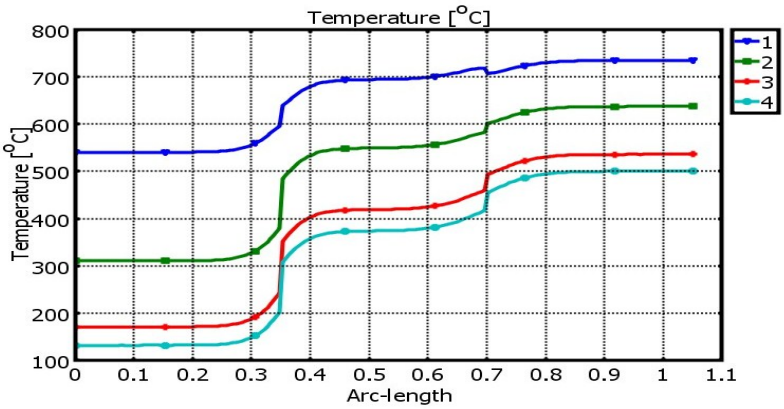


Рис. 3. Графики аксиального распределения температуры в первой секции:
1 – на поверхности; 2 – на глубине 30 мм; 3 – на глубине 60 мм; 4 – в центре

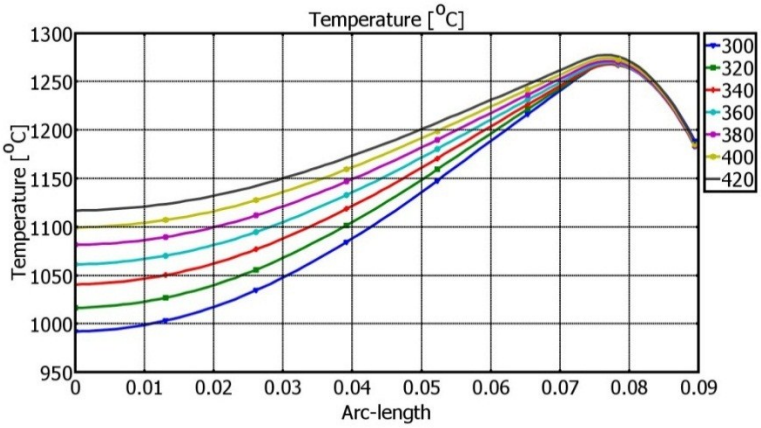


Рис. 4. Результирующее радиальное температурное распределение
в заготовке на выходе из нагревателя

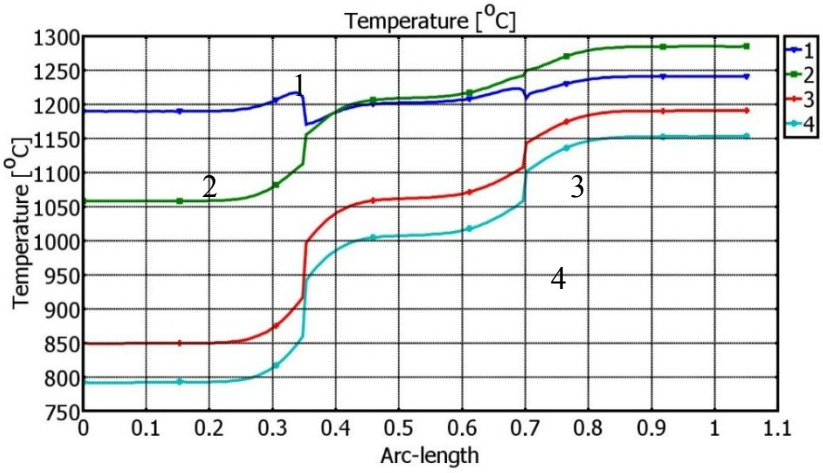


Рис. 5. Графики аксиального распределения температуры
в секции повышенной частоты:
1 – на поверхности; 2 – на глубине 30 мм; 3 – на глубине 60 мм; 4 – в центре

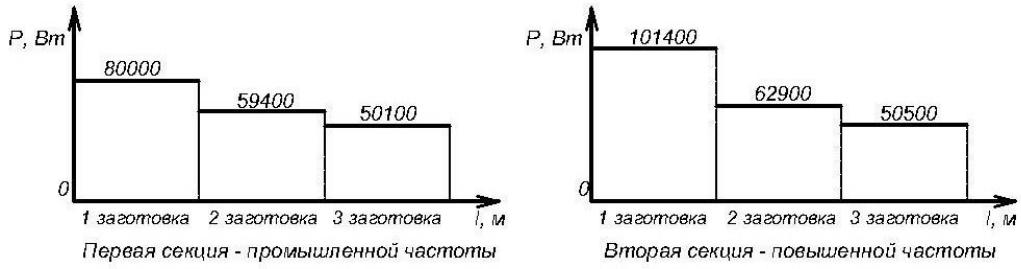


Рис. 6. Распределение мощности тепловыделения по длине загрузки

Неравномерное распределение мощности, выделяемой в заготовках, объясняется влиянием изменяющихся в процессе нагрева свойств металла загрузки – магнитной проницаемости и удельного сопротивления – на мощность тепловыделения в заготовках.

Как следует из представленных результатов, предложенная методика расчета

оптимальных конструктивных и режимных параметров двухчастотного нагревателя дает существенные преимущества, заключающиеся в улучшении массогабаритных показателей нагревательной системы и снижении суммарных энергозатрат. Так, энергетические характеристики односекционного нагревателя, работающего на частоте 1000 Гц, существенно отличаются от аналогичных характеристик двухчастотного индукционного нагревателя. Длина двухчастотного индукционного нагревателя, рассчитанного по предложенной методике, при той же производительности составляет 2,3 м, в то время как длина нагревателя, реализованного на рабочей частоте 1000 Гц, составляет 3,2 м. Уменьшение длины двухчастотного нагревателя привело к повышению теплового и общего КПД установки. Уменьшилась также реактивная мощность индуктора, емкость конденсаторной батареи и число конденсаторов для компенсации реактивной мощности нагревателя.

Заключение

На основании проведенных исследований электромагнитных и тепловых процессов в системе индукционного нагрева разработан алгоритм поиска конструктивных и режимных параметров двухсекционного нагревателя, минимизирующий массогабаритные показатели нагревателя в условиях строгих ограничений на отклонения температуры от заданного распределения. Предложенная методика использована для расчета установившихся режимов двухсекционного нагревателя с заданными выходными характеристиками нагрева – температурным распределением по объему заготовки на выходе из нагревателя с допустимой точностью. Определена оптимальная частота для каждой секции нагревателя исходя из условия максимального коэффициента полезного действия. Предложена итерационная процедура определения оптимальной длины двухсекционного нагревателя с использованием численных моделей электромагнитных и тепловых полей. Предложенная методика учитывает различные виды теплообмена в системе «загрузка – футеровка» в секциях нагревателя. Результаты исследований позволили уменьшить на 23 % длину нагревательной системы при одновременном снижении на 12 % суммарных потерь энергии по сравнению с нагревателем, работающим на одной частоте. Показано, что при повышении точности нагрева алгоритм расчета оптимальной длины нагревателя остается неизменным, при этом увеличивается длина второй секции нагревателя и потребляемая мощность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Безручко И.И.* Индукционный нагрев для объемной штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 127 с.
2. *Головин Г.Ф., Зимин Н.В.* Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Под ред. А.Н. Шамова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 87 с.
3. *Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А.* Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве // Индукционный нагрев. – 2013. – № 2(24). – С. 15–17.
4. *Демидович В.Б., Никитин Б.М., Иванов В.Н., Червинский В.И., Баранкова И.И.* Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии // Индукционный нагрев. – 2008. – № 4. – С. 20–26.
5. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
6. *Rudnev V.* Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. – 657 p.
7. *Афиногентов А.А., Деревянов М.Ю.* Эффективные стратегии функционирования производ-

ственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 162–167.
8. *Rapoport E.Y.* Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012, Vol. 51, No. 3, pp. 375–390. Импакт-фактор журнала в Web of Science 0,191.
9. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла: моногр. – М.: Наука, 2012. – 219 с.
10. *Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А.* Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
11. *Кувалдин А.Б.* Индукционный нагрев ферромагнитных сталей. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
12. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.
13. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
14. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
15. *Кувалдин А.Б.* Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных средах // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 56–61.
16. *Базаров А.А.* Моделирование процесса теплопроводности для задач синтеза систем управления в среде MATLAB // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – № 33. – С. 7–11.
17. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.9. – СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2009.
18. *Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А.* Комплексное моделирование и управление процессом непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2(50). – С. 128–139.
19. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
20. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
21. *Данилушкин А.И., Князев С.В., Кожемякин А.В.* Оптимизация энергопотребления в системах электроснабжения кузнечных индукционных нагревателей // Электромеханика. Известия вузов. Спец. выпуск «Электроснабжение». – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – С. 34–35.
22. *Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Животягин Д.А.* Параметрический анализ и оптимальное проектирование индукционной системы по критерию максимального коэффициента полезного действия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 143–153.
23. *Турбин В.В.* Численное моделирование процесса проходного индукционного нагрева металла перед пластической деформацией // Новая наука: Проблемы и перспективы. – 2017. – № 1–2. – С. 178–180.
24. *Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Мостовой А.П.* Исследование режима нагрева ферромагнитных заготовок в двухчастотном индукционном нагревателе дискретно-непрерывного действия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 3 (72). – С. 111–116.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2020 г.

OPTIMIZATION OF THE ELECTRICAL TECHNOLOGY COMPLEX FOR HIGH-PERFORMANCE INDUCTION HEATING LINES

A.I. Danilushkin, D.A. Zhivotyagin, S.S. Kibkalo, D.V. Surkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper discusses the design issues of a high-performance induction installation for heating ferromagnetic billets before processing on deforming equipment. Specific features of the technological process of heating ferromagnetic billets to plastic strain temperatures are noted. It is shown that in order to increase the efficiency of the process, the heating of large-sized preforms from ferromagnetic steel is advisable to be carried out in a two-frequency induction heater with two autonomous sections. A study of the heating process in a two-section heater of ferromagnetic billets was carried out taking into account the nonlinear dependence of the physical characteristics of the heated billets metal on the temperature changing during heating. The problem of minimizing the length of a two-section heater is formulated and solved taking into account energy and technological limitations. A condition for determining the optimal length of the first section is to achieve a temperature corresponding to the loss of magnetic properties in the layer equal to the depth of current penetration at the frequency of the second section power supply. The results of numerical calculation of the optimal parameters of a two-section heater are presented. It is shown that the power distribution algorithm along the length of a two-section heater is a piecewise constant function. The results of calculating the temperature distribution in the workpieces during heating are presented. The results of the study can be used to solve the problem of optimizing the structural and operational parameters of a multi-section heater.*

Keywords: *induction heating, frequency, mathematical model, temperature distribution, optimal design.*

REFERENCES

1. *Bezruchko I.I.* Indukcionnyj nagrev dlja ob#emnoj shtampovki. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. 127 s.
2. *Golovin G.F., Zimin N.V.* Tehnologija termicheskoj obrabotki metallov s primeneniem indukcionnogo nagreva / Pod red. A.N. Shamova. L.: Mashinostroenie. Leningr.otd-nie, 1990. 87 s.
3. *Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Sit'ko P.A.* Modelirovanie i optimizacija indukcionnyh nagrevatelej mernyh zagotovok v kuznechnom proizvodstve. Indukcionnyj nagrev, 2013. № 2(24). S. 15–17.
4. *Demidovich V.B., Nikitin B.M., Ivanov V.N., Chervinskij V.I., Barankova I.I.* Aktual'nye jenergosberegajushhie tehnologii indukcionnogo nagreva v metallurgii. Zh–l «Indukcionnyj nagrev», 2008, № 4, s. 20–26.
5. *Nemkov V.S., Demidovich V.B.* Teorija i raschet ustrojstv indukcionnogo nagreva. L.: Jenergoatomizdat, 1988. 280 s.
6. *Rudnev V.* Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. 657 p.
7. *Afinogentov A.A., Derevjanov M.Ju.* Jeffektivnye strategii funkcionirovanija proizvodstvennogo kompleksa «nagrev – obrabotka metalla davleniem» // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija: Tehnicheskie nauki, 2015, № 3, s. 162–167.
8. *Rapoport E.Y.* Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012,Vol. 51, No. 3, p. 375–

Aleksandr I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Denis A. Zhivotyagin, Postgraduate Student.
Sergey S. Kibkalo, Postgraduate Student.
Dmitry V. Surkov Postgraduate Student.

390. Impakt faktor zhurnala v Web of Science 0,191.
9. *Rapoport Je.Ja., Pleshivceva Ju.Je.* Optimal'noe upravlenie temperaturnymi rezhimami indukcionnogo nagreva metalla: monogr. M.: Nauka, 2012. M.: Nauka, 2012. 219 s.
10. *Sluhockij A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A.* Ustanovki indukcionnogo nagreva. L.: Jenergoizdat, 1981. 328 s.
11. *Kuvaldin A.B.* Indukcionnyj nagrev ferromagnitnyh stalej. M.: Jenergoatomizdat, 1988. 200 s.
12. *Vajnberg A.M.* Indukcionnye plavil'nye pechi. M.: Jenergija, 1967. 416 s.
13. *Kartashov Je.M.* Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdyh tel. M.: Vysshaja shkola, 2001. 550 s.
14. *Lykov A.V.* Teplomassoobmen (Spravochnik). M.: Jenergija, 1978. 480 s.
15. *Kuvaldin A.B.* Matematicheskie modeli dlja issledovanija jelektromagnitnogo polja v ferromagnitnyh sredah // Jelektrichestvo. 2005. № 11. s. 56–61.
16. *Bazarov A.A.* Modelirovanie processa teploprovodnosti dlja zadach sinteza sistem upravlenija v srede MATLAB. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija «Tehnicheskie nauki», vyp. 33, 2005 s. 7–11.
17. ELCUT. Modelirovanie dvumernyh polej metodom konechnyh jelementov. Rukovodstvo pol'zovatelja. Versija 5.9. S-Pb.: Proizvodstvennyj kooperativ TOR, 2009.
18. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A.* Kompleksnoe modelirovanie i upravlenie processom nepreryvnogo indukcionnogo nagreva ferromagnitnyh zagotovok. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija «Tehnicheskie nauki», 2016, Vyp. № 2 (50). S. 128–139.
19. *Rapoport Je.Ja.* Optimal'noe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami. M.: Vysshaja shkola, 2009, 677 s.
20. *Sluhockij A.E., Ryskin S.E.* Induktory dlja indukcionnogo nagreva. L.: Jenergija, 1974. 264 s.
21. *Danilushkin A.I., Knjazev S.V., Kozhemjakin A.V.* Optimizacija jenergopotreblenija v sistemah jelektrosnabzhenija kuznechnyh indukcionnyh nagrevatelej // Jelektromehanika. Izvestija vuzov. Special'nyj vypusk «Jelektrosnabzhenie». Novocherkassk: JuRGTU (NPI), 2009. S. 34–35.
22. *Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Zhivotjagin D.A.* Parametricheskij analiz i optimal'noe proektirovanie indukcionnoj sistemy po kriteriju maksimal'nogo kojefficienta poleznogo dejstvija // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija: Tehnicheskie nauki. 2018. № 3. S. 143–153.
23. *Turbin V.V.* Chislennoe modelirovanie processa prohodnogo indukcionnogo nagreva metalla pered plasticheskoj deformaciej // Novaja nauka: Problemy i perspektivy. 2017. № 1–2. S. 178–180.
24. *Danilushkin A.I., Kozhemjakin A.V., Mostovoj A.P.* Issledovanie rezhima nagreva ferromagnitnyh zagotovok v dvuhchastotnom indukcionnom nagrevatele diskretno-nepreryvnogo dejstvija. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija «Tehnicheskie nauki». 2013. Vyp. № 3 (72). s. 111–116.

doi: 10.14498/tech.2020.3.8

УДК 621.313.84

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЗАПУСКЕ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ю.В. Зубков, С.Ю. Кауров, В.Е. Верещагин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Аннотация. *Исследуется интегрированный стартер-генератор на основе синхронной машины с магнитоэлектрическим возбуждением (ИСГ), применяемый для запуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автономного энергетического объекта или транспортного средства и снабжения электрической энергией его потребителей. Цель работы – получение математической модели стартерного режима в виде системы дифференциальных уравнений, виртуализация полученной модели посредством пакета Matlab Simulink и имитационное моделирование запуска дизельного двигателя с помощью ИСГ с исследованием динамических характеристик процесса пуска. Необходимо осуществить экспериментальную верификацию теоретических результатов посредством натурных испытаний опытного образца стартер-генератора для подтверждения адекватности математической модели. Трудности анализа и синтеза ИСГ обусловлены сложностью процессов электромеханического преобразования энергии в нем и трапецеидальным характером пространственного распределения магнитного поля в зазоре, что было установлено при решении магнитостатической задачи методом конечных элементов. Эти особенности затрудняют использование традиционных методик исследования. Математическая модель стартерного режима работы, полученная при ряде допущений, не влияющих на характер электромеханических процессов, позволяет исследовать статические и динамические характеристики ИСГ при электрическом запуске ДВС. На основе уравнений, описывающих работу стартера, осуществлено имитационное моделирование процесса пуска ДВС с применением систем управления без ограничения и с ограничением величины пускового тока и обеспечением достаточного пускового момента, позволяющее определить длительность запуска и характер изменения электромагнитного момента, токов инвертора и обмоток. Спроектирован и изготовлен опытный образец ИСГ. Проведены натурные испытания системы электрического запуска дизельного двигателя. Полученные результаты подтвердили адекватность разработанной математической модели и возможность ее использования при исследовании других специфических режимов работы ИСГ.*

Ключевые слова: *интегрированный стартер-генератор, математическая модель, имитационное моделирование, экспериментальные исследования.*

Зубков Юрий Валентинович (д.т.н.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Кауров Сергей Юрьевич, инженер кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Верещагин Владислав Евгеньевич, старший преподаватель кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Введение

В настоящее время расширяется применение мехатронных систем в автономных мобильных объектах. Современное транспортное средство, летательный аппарат, морское или речное судно, специальная техника на гусеничном и колесном ходу являются объектами приложения новых идей и технических решений из различных областей прикладной науки.

Энергетической базой любого автономного объекта (АО) является силовая установка. Чаще других в таких объектах в качестве основного движителя применяются двигатели внутреннего сгорания (ДВС) или реактивные двигатели, а основной частью силовой установки являются системы запуска двигателя и генерации электрической энергии. Наличие двух раздельных электрических машин, выполняющих функции стартера и генератора, не всегда оправдано и часто невыполнимо по условиям размещения. Естественным желанием разработчика является снижение массогабаритных показателей силовой установки за счет объединения этих двух электромеханических преобразователей (ЭМП) в одном устройстве – стартер-генераторе. Однако противоречивые требования к системам запуска ДВС и генерации электроэнергии на протяжении длительного времени не позволяли осуществить такую замену. До настоящего времени стартер и генератор АО в большинстве случаев являются отдельными электрическими машинами.

Предпосылками решения данной проблемы явились появление высококоэрцитивных магнитов, обладающих хорошими энергетическими характеристиками, новых силовых полупроводниковых управляемых элементов (IGBT, MOSFET), развитие регулируемого вентильного электропривода, позволяющее с одной стороны повысить надежность систем запуска и генерации электроэнергии, а с другой – реализовать требуемые характеристики стартера и генератора в одном ЭМП.

Сейчас наиболее перспективным кандидатом для реализации функций запуска и генерации в одном устройстве является синхронная машина с постоянными магнитами (СМПМ) как один из наиболее динамично развивающихся типов электромеханических преобразователей энергии [1–3]. До настоящего времени СМПМ использовались в основном в качестве синхронных генераторов и синхронных двигателей в системах автоматики. Использование СМПМ в качестве стартер-генератора является перспективным решением, поскольку она имеет более простую, технологичную и надежную конструкцию по сравнению с ЭМП других типов, хорошо приспособлена для работы во взрывоопасных и агрессивных средах, в условиях низких температуры и давления.

Другим трендом конструктивного исполнения стартер-генератора АО является его интегрирование в силовую установку, что существенно облегчает компоновку и экономит место в ограниченном околодвигательном пространстве [4–7]. Такой ЭМП получил название «интегрированный стартер-генератор» (ИСГ). В генераторном режиме ИСГ работает на выпрямительную нагрузку с параллельно подключенной аккумуляторной батареей (АБ). Такой режим синхронной машины довольно хорошо изучен и освещен в научно-технической литературе без учета особенностей, накладываемых интегрированным исполнением [8]. В стартерном (двигательном) режиме работы ИСГ реализуется дискретный способ управления положением результирующего вектора магнитодвижущей силой (МДС) статора относительно МДС вращающего ротора [9, 10]. При этом способе управления положением вектора МДС статора используется такой алгоритм пе-

реключения силовых ключей, при котором инвертор формирует переменное напряжение прямоугольной формы на фазах якорной обмотки двигателя.

Трудности проектирования ИСГ на базе СМПМ в основном вызваны учетом особенностей его работы в стартерном режиме и обусловлены сложностью процессов электромеханического преобразования энергии, происходящих в нем. Трапецеидальный характер пространственного распределения магнитного поля в воздушном зазоре определяет сложность использования традиционных подходов к анализу и проектированию ИСГ, базирующихся на синусоидальном характере распределения и классических математических моделях синхронных электрических машин.

Математическое описание ИСГ

Известные модели анализа двигательного режима ИСГ на базе СМПМ описывают электрическую машину как квазинепрерывную систему с импульсными воздействиями и требуют для анализа квазиустановившихся процессов применения метода коммутационных функций, использования операторно-рекуррентного анализа [11], что является трудоемким и не всегда отражает процессы электромеханического преобразования энергии, происходящие в двигательном режиме работы ИСГ.

При разработке математической модели ИСГ, имеющей невысокий порядок и приемлемую точность, были приняты допущения:

– насыщение магнитопроводов статора и ротора отсутствует;

– магнитные потоки рассеяния, создаваемые постоянными магнитами, минимальны и не учитываются;

– потери на гистерезис и вихревые токи отсутствуют;

– в процессе пуска ДВС ИСГ работает в диапазоне угловых скоростей от 0 до 20÷40 рад/с;

– коммутационный интервал значительно меньше межкоммутационного и не учитывается при выводе уравнений;

– взаимные индуктивности между фазами обмотки статора пренебрежимо малы.

С учетом сделанных допущений электромагнитные процессы ИСГ в фазных координатах описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_A = R_s i_A + L_s \dfrac{di_A}{dt} + e_A; \\ u_B = R_s i_B + L_s \dfrac{di_B}{dt} + e_B; \\ u_C = R_s i_C + L_s \dfrac{di_C}{dt} + e_C, \end{cases}$$

где u, i, e – фазные напряжения, токи, ЭДС вращения обмотки статора;

R_s, L_s – активное сопротивление и индуктивность обмотки.

При постоянной угловой скорости ротора форма фазных ЭДС вращения, индуцированных в статорных обмотках, будет подобна форме кривой распределения индукции $B_\delta(\theta_{эл})$ в воздушном зазоре [9]:

$$e_к = -\frac{d\Psi_{mk}(\theta_{эл})}{dt} = -\frac{d\Psi_{mk}(\theta_{эл})}{d\theta_{эл}} \cdot \frac{d\theta_{эл}}{dt} = C_k B_\delta(\theta_{эл}) \cdot \omega_{эл},$$

где $\omega_{эл} = \frac{d\theta_{эл}}{dt}$ – электрическая угловая скорость ротора;

$\theta_{эл}$ – электрический угол поворота ротора относительно статора;

C_k – конструктивная постоянная;

Ψ_{mk} – потокосцепление постоянных магнитов с k-й обмоткой статора;

B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Электромагнитный момент ИСГ:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_r} = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega_r}, \quad (1)$$

где $\omega_r = \frac{\omega_{эл}}{p}$ – механическая угловая скорость ротора;

$P_{эм}$ – электромагнитная мощность;

p – число пар полюсов.

Ротор набран из отдельных сегментов постоянных магнитов, расположенных на магнитопроводе из магнитомягкого материала. В качестве ПМ используются магниты на основе соединений NdFeB [12]. Магнитопровод статора выполнен шихтованным из электротехнической стали.

При выводе уравнений ИСГ необходимо иметь представление о характере распределения магнитного поля в зазоре. На рис. 1 приведена кривая распределения магнитной индукции в зазоре ИСГ, полученная в результате решения магнитостатической задачи методом конечных элементов, и аппроксимирующая ее на одном полюсном делении равнобокая трапеция. Как видно из рисунка, магнитная индукция B_δ в воздушном зазоре ИСГ с возбуждением от ПМ распределена трапецеидально и может быть в первом приближении аппроксимирована гладкой трапецией.

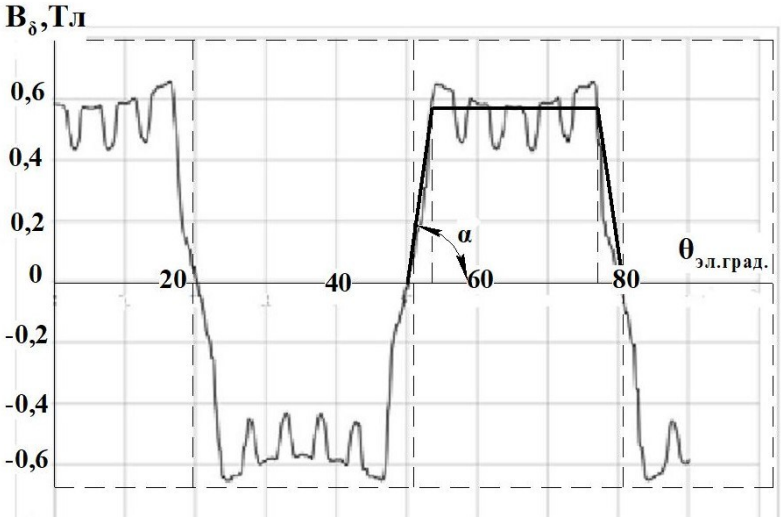


Рис. 1. Реальная и аппроксимирующая ее кривые распределения магнитной индукции в зазоре ИСГ

Трапецеидальную функцию $B_\delta(\theta_{эл})$ с наклоном ребер α и (π-α) электрических градусов в положительном полупериоде можно записать через разложение в ряд Фурье:

$$B_{\delta k}(\theta_{эл}) = \frac{4B_m}{\alpha\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\left[\theta_{эл} - (k-1)\frac{2\pi}{3}\right], \qquad (2)$$

где k – номер фазы обмотки статора: k=1– для фазы A, k=2 – для фазы B, k=3 – для фазы C;

B_m – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

ЭДС вращения вычисляется по формуле

$$e(\theta) = w \cdot l \cdot v \frac{\partial}{\partial\theta} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B(\theta)\, d\theta = w \cdot v \cdot l\left[B_2(\theta) - B_1(\theta)\right],$$

где $v = \omega_r \dfrac{D}{2} = \omega_{эл} \dfrac{D}{2p}$ – линейная скорость вращения ротора.

В обмотках с диаметральным шагом $B_1(\theta) = -B_2(\theta)$, что приводит к выражению для ЭДС фазы:

$$e(\theta_{эл}) = 2w \cdot B_\delta(\theta_{эл}) \cdot l \cdot v = 2w \cdot B_\delta(\theta_{эл}) \frac{l \cdot D}{2p} \omega_{эл} = w \cdot B_\delta(\theta_{эл}) \cdot D \cdot l \cdot \omega_r.$$

Поставляя в последнее выражение аппроксимированное значение, аппроксимирующее индукцию $B_{\delta k}(\theta_{эл})$, из (2) получим следующие выражения для фазных ЭДС вращения:

$$\begin{cases} e'_A(\theta_{эл}) = k_o w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[\dfrac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\theta_{эл}\right]\omega_r; \\ e'_B(\theta_{эл}) = k_o w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[\dfrac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\left(\theta_{эл} - \dfrac{2\pi}{3}\right)\right]\omega_r; \\ e'_C(\theta_{эл}) = k_o w \cdot D \cdot l \cdot B_m \left[\dfrac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\left(\theta_{эл} - \dfrac{4\pi}{3}\right)\right]\omega_r, \end{cases} \qquad (3)$$

где k_o – обмоточный коэффициент;

$\Psi_m = k_o \cdot w \cdot D \cdot l \cdot B_m$ – амплитуда потокосцепления постоянных магнитов с обмотками статора.

Введем функции $f_A(\theta_{эл}), f_B(\theta_{эл}), f_C(\theta_{эл})$, описывающие изменение трапецеидальных ЭДС в фазах с предельными значениями от -1 до 1 в зависимости от положения ротора:

$$\begin{cases} f_A(\theta_{эл}) = \dfrac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\theta_{эл}; \\ f_B(\theta_{эл}) = \dfrac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\left(\theta_{эл} - \dfrac{2\pi}{3}\right); \\ f_C(\theta_{эл}) = \dfrac{4}{\alpha \cdot \pi} \sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{\sin(2n-1)\alpha}{(2n-1)^2} \cdot \sin(2n-1)\left(\theta_{эл} - \dfrac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

С учетом введенных обозначений имеем следующие выражения для ЭДС вращения однопериодической модели в фазах *A, B, C*:

$$\begin{cases} e'_A(\theta_{эл}) = \Psi_m \cdot f_A(\theta_{эл}) \cdot \omega_r; \\ e'_B(\theta_{эл}) = \Psi_m \cdot f_B(\theta_{эл}) \cdot \omega_r; \\ e'_C(\theta_{эл}) = \Psi_m \cdot f_C(\theta_{эл}) \cdot \omega_r. \end{cases}$$

При переходе от однопериодической модели к *p*-периодической число катушек каждой фазы при последовательном соединении увеличивается в *p* раз.

Тогда соотношения для фазных ЭДС *2p* полюсной модели будут иметь вид:

$$\begin{cases} e_A = pe'_A(\theta_{эл}); \\ e_B = pe'_B(\theta_{эл}); \\ e_C = pe'_C(\theta_{эл}). \end{cases} \tag{4}$$

Подставив соотношения для фазных ЭДС в (1), получим выражение для мгновенного значения электромагнитного момента ИСГ:

$$\begin{aligned} M = p \cdot \Psi_m \cdot f_A(\theta_{эл}) \cdot i_A + p \cdot \Psi_m \cdot f_B(\theta_{эл}) \cdot i_B + p \cdot \Psi_m \cdot f_C(\theta_{эл}) \cdot i_C = \\ M_A + M_B + M_C, \end{aligned} \tag{5}$$

где M_A, M_B, M_C – электромагнитные моменты, образуемые фазами *A, B, C* при протекании в них фазных токов.

К полученным уравнениям следует добавить уравнение движения:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c, \tag{6}$$

где J – суммарный момент инерции системы ИСГ–ДВС;

M_c – момент сопротивления на валу ИСГ в режиме пуска ДВС.

Соотношения (3–6) описывают математическую модель ИСГ в стартерном режиме работы. Полученная математическая модель позволяет осуществлять исследование работы ИСГ в режиме пуска ДВС – оценивать величины пусковых токов, протекающих по фазам инвертора и обмоткам статора, пускового момента, изучать динамику работы системы ИСГ–ДВС.

Моделирование процесса пуска ДВС

При эксплуатации ИСГ наиболее распространенным режимом является его прямое включение при пуске ДВС [13]. При прямом пуске статорные обмотки ИСГ через инвертор подключаются на полное напряжение питания. Прямой пуск ДВС неблагоприятен для источника питания – АБ, при ограниченной емкости которой напряжение в ней падает на (30–40 %), что нарушает работу других потребителей. К недостаткам прямого пуска следует также отнести нерациональный расход емкости АБ из-за значительной неравномерности тока, низкий КПД (до 35 %). Предложенный авторами регулируемый запуск [14] устраняет перечисленные недостатки и при этом дополнительно обеспечивает выбор люфтов в редукторе коробке передач при небольшой начальной частоте вращения. В режиме регулируемого пуска ИСГ с системой управления образует одноконтурную скоростную систему автоматического регулирования [15].

С использованием разработанной математической модели ИСГ было осуществлено моделирование процесса прямого пуска в двух вариантах: без ограничения пускового тока и с ограничением его величины ниже допустимой по условиям значения напряжения бортовой сети ТС. Моделирование проводилось с применением пакета *Matlab Simulink*. Наличие в библиотеке пакета *Sim Power System* виртуальных моделей синхронной машины с магнитоэлектрическим возбуждением (PMSM), трехфазного инвертора, управляемого источника напряжения позволяет использовать виртуальные (имитационные) модели для исследования динамических характеристик ИСГ в режиме пуска ДВС.

Модель синхронной машины, возбуждаемой от постоянных магнитов, с трапецеидальным распределением магнитного поля в зазоре, представленная в системе Matlab Simulink, состоит из двух частей – электромагнитной и электромеханической. Параметры моделируемого ИСГ:

$$R_s = 8\cdot 10^{-3} Ом,\ \ L_s = 1{,}6\cdot 10^{-4}\, Гн,\ \ \Psi_m = 0{,}133\, Вб;$$

$$J = 10 кг\cdot м^2,\ \ p = 6,\ \ \kappa_0 \cdot w_S = 24,\ \ M_{н0} = 120 Н\cdot м.$$

Модель системы ИСГ–ДВС, имитирующая пуск без ограничения тока, показана на рис. 2.

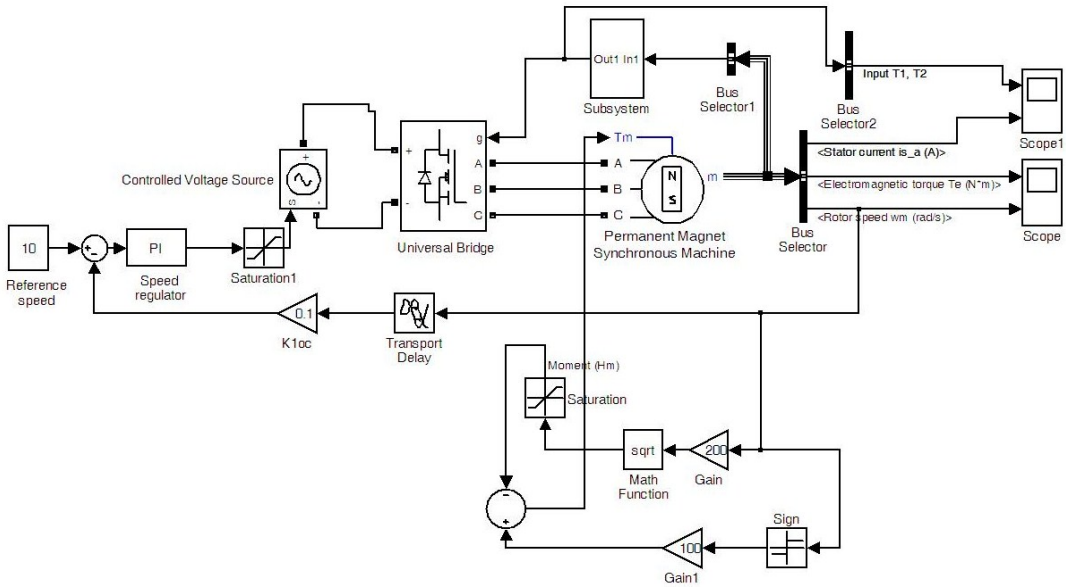


Рис. 2. Имитационная модель пуска ДВС без ограничения тока

Допущения, принятые при моделировании:

– напряжение АБ постоянно и не зависит от нагрузки ИСГ;

– ИСГ симметричен в магнитном отношении, потери в стали не учитываются;

– реакция якоря отсутствует;

– трехфазный инвертор, играющий роль коммутатора, идеализирован, т. е. силовые транзисторные ключи имеют большое сопротивление (0,5 МОм) в закрытом состоянии, а их сопротивление в открытом состоянии имеет малое значение (10^{-3} Ом);

– величина напряжения питания инвертора при работе в пусковом режиме учитывает падение напряжения на АБ и в проводах, соединяющих ИСГ и АБ;

– при моделировании механической нагрузки на валу ИСГ учитывается среднее значение момента сопротивления M_c ДВС;

– угол опережения коммутации ключей инвертора β_0=0.

Переходные процессы в замкнутой одноконтурной системе регулирования частоты вращения по моменту и скорости при подаче входного (управляющего) сигнала и набросе возмущения (момента сопротивления на валу ИСГ) в момент времени t=0 представлены характеристиками, приведенными на рис. 3.

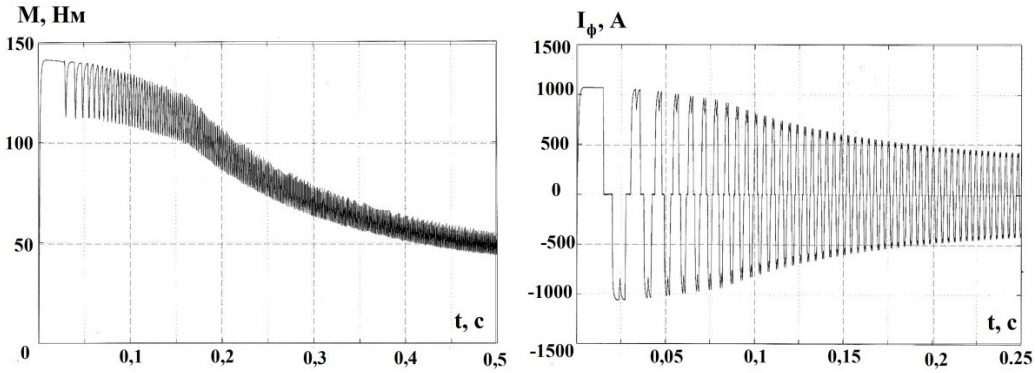


Рис. 3. Электромагнитный момент и ток фазы статора при пуске в системе без ограничения тока

Анализ полученных в ходе моделирования осциллограмм показал достаточную величину пускового момента для страгивания вала ДВС. Частота вращения ИСГ в режиме пуска достигает значения $\omega = 14{,}3\ рад/с$ (n=150 мин$^{-1}$) за 0,5 с от момента подачи напряжения, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электропусковым системам транспортных средств. Величина пускового тока превышает 1000 А. Такой большой ток негативно сказывается на бортовых потребителях и АБ, поэтому было предложено техническое решение, позволяющее ограничивать пусковой ток приемлемой величиной, определенной для каждого автономного объекта или ТС. На рис. 4 показана электромеханическая характеристика ИСГ в системе запуска с ограничением тока.

На первом этапе пуска (зона 1, $I_и \geq I_{и\ доп}$, где $I_{и\ доп}$ – допустимый ток инвертора) действует нелинейная обратная связь по току, которая ограничивает пусковой ток ИСГ. На втором этапе (зона 2, $I_и < I_{и\ доп}$) действует только обратная связь по угловой скорости, обеспечивая требуемое нарастание скорости вращения ИСГ.

Переходные процессы по электромагнитному моменту и току фазы статора ИСГ в замкнутой системе регулирования скорости с ограничением пускового тока приведены на рис. 5. Анализ осциллограмм процесса пуска показывает, что время достижения той же частоты вращения при ограничении пускового тока на 0,15 с больше, чем без ограничения пускового тока, и составляет 0,65 с, что в целом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к времени запуска ДВС электропусковыми системами транспортных средств. При этом значение пускового тока, протекающего через инвертор и фазы обмотки статора ИСГ, не превышает допустимого значения $I_{доп}$ = 1000 А.

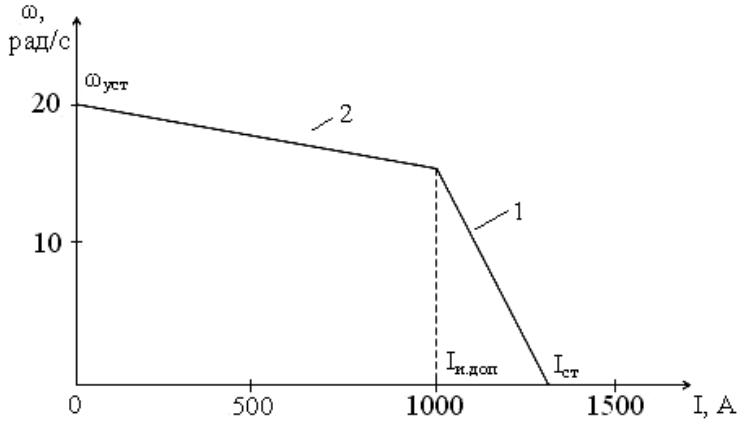


Рис. 4. Электромеханическая характеристика ИСГ при запуске ДВС с ограничением тока:
$\omega_{уст}$=20 рад/с (n=200 мин$^{-1}$); $I_{и.доп}$=1000 А

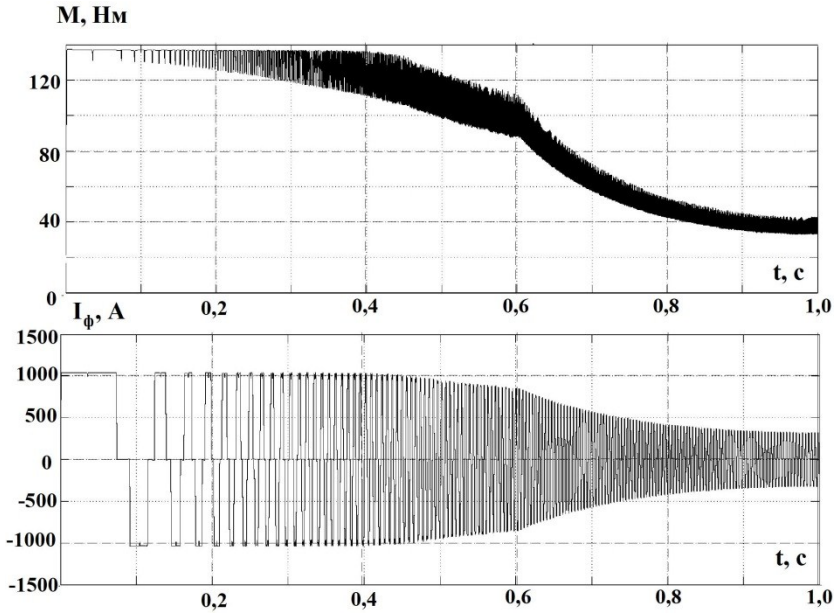


Рис. 5. Электромагнитный момент и ток фазы статора в системе с ограничением тока

Практическая реализация ИСГ и экспериментальная верификация модели

В рамках инициативной НИР был спроектирован и изготовлен опытный образец ИСГ с системой управления (рис. 6), предназначенный для системы электроснабжения вспомогательной ДГУ автономных энергетических объектов и ТС. Основные характеристики и геометрические размеры опытного образца ИСГ приведены в таблице.

Технические данные и размеры ИСГ

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Величина
Число фаз	m	–	3
Фазное напряжение	$U_{ф1}$	В	27–63
Фазный ток	$I_ф$	А	300
Частота вращения	n	мин$^{-1}$	1500÷3450
Число полюсов	$2p$	–	12
Наружный диаметр статора	D_a	мм	290
Диаметр расточки статора	D_i	мм	174
Число зубцов статора	Z_1	–	72
Тип и размеры постоянных магнитов	NdFeB, $h_m \times b_m \times l_m$	мм	8×40×55
Величина воздушного зазора	δ	мм	1
Коэрцитивная сила ПМ	$H_{св}$	кА/м	1000
Марка стали статора и ротора	–	–	2412

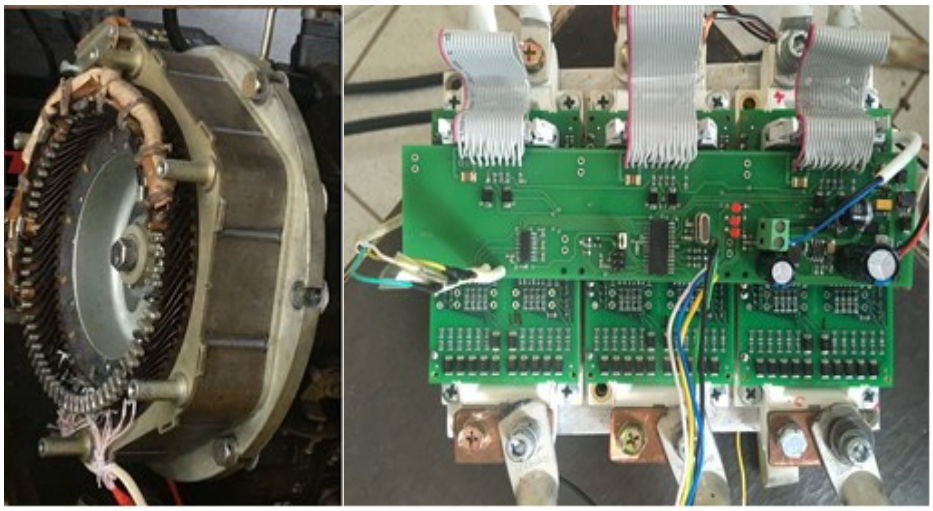


Рис. 6. Опытный образец ИСГ и система управления

С целью проверки и подтверждения адекватности математической модели, полученной выше, были проведены экспериментальные исследования работы ИСГ в стартерном режиме (режим прокрутки дизельного двигателя). Структурная схема экспериментальной установки для измерения тока инвертора и испытательный стенд для исследования стартерного режима работы ИСГ показаны на рис. 7.

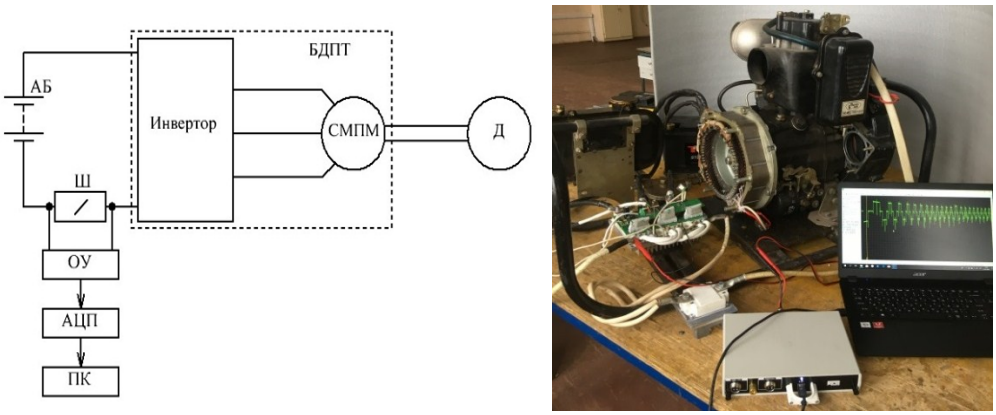


Рис. 7. Структурная схема и экспериментальная установка:
АБ – аккумуляторные батареи типа 12СТС-85С1, соединенные параллельно; Ш – измерительный шунт, 75ШСМ300А; ОУ – операционный усилитель, LT1990; АЦП – аналого-цифровой преобразователь, Е-154; ПК – персональный компьютер; Д – дизель типа ТМЗ-450Д

В процессе пуска ДВС производилась регистрация потребляемого ИСГ от инвертора тока и фазного тока статора. Осциллограммы указанных токов приведены на рис. 8. В эксперименте реализована система запуска без ограничения тока.

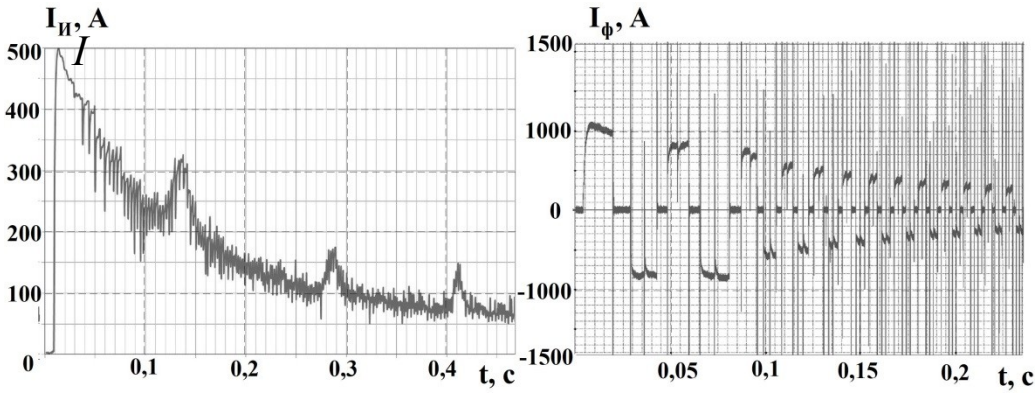


Рис .8. Осциллограммы токов инвертора и статора ИСГ

Анализ приведенных осциллограмм токов инвертора и фазы статора ИСГ показывает, что время запуска дизельного двигателя при пуске с ограничением тока составляет 0,5 с, что хорошо согласуется с данными имитационного моделирования.

Заключение

Получено математическое описание двигательного режима работы интегрированной стартер-генераторной установки при трапецеидальном распределении магнитного поля в зазоре электромеханического преобразователя. Характер распределения индукции установлен в результате решения магнитостатической задачи методом конечных элементов.

Разработанная математическая модель положена в основу имитационного исследования процесса запуска дизельного двигателя в системах без ограничения и с ограничением пускового тока. Результаты моделирования в виде осциллограмм фазного тока, электромагнитного момента показали хорошее быстродействие системы запуска и допустимые величины токов в инверторе и обмотках ИСГ в момент пуска при использовании ограничения тока.

С целью подтверждения теоретических положений разработан и изготовлен опытный образец ИСГ и проведено экспериментальное исследование стартерного режима его работы. Временные зависимости токов инвертора и обмотки статора, полученные в ходе эксперимента, полностью согласуются с результатами имитационного моделирования, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Макаричев Ю.А., Зубков, Ю.В., Иванников Ю.Н., Гуляев И.В.* Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки // Электротехника. – 2019. – № 7. – С. 24–32.
2. *He Ch., Wu Th.* Analysis and Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor and Generator // Ces transactions on electrical machines and systems. 2019. vol. 3. № 1. P. 94–100.
3. *Zhu X., Hua W., Wang B., Dai N.* Comparison of stator- and rotor-surface-mounted PM brushless machines // IET Electric Power Applications. 2020, vol. 14, № 1. P. 62–70.
4. *Ганджа С.А., Ерлышева А.В.* Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2005. – № 9. – С. 84–86.
5. *Кузнецов В.А., Николаев В.В.* Стратегия проектирования вентильного стартер-генератора // Электротехника. – 2005. – № 4. – С. 46–50.
6. *Leonardi F., Degner M.* Integrated Starter Generator Based HEVs: A Comparison Between Low And High Voltage Systems // IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2001. P. 622–629.
7. *Huang Po-Wei, Tsai Mi-Ching, Ubadigha Ch.* Investigation of high power density permanent magnet integrated starter-generator based on dual air-gap design // IEEE Int. Conf. of Elec. Mach. 2017. P. 609–614.
8. *Мигунов А.Л., Кауров С.Ю.* Анализ и выбор перспективных постоянных магнитов для магнитных систем стартер-генераторных установок легковых автомобилей // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 1. – С. 30–33.
9. *Фираго Б.И., Павлячик Л.Б.* Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
10. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
11. *Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулупов П.В.* Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 340 с.
12. Arnold. Magnetic technologies. http://www.arnoldmagnetics.com/permanent-magnets/ (accessed June28, 2020).
13. *Грузков С.А.* Электрооборудование летательных аппаратов. Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 р.
14. Патент РФ 2543076. Стартер-генератор автомобиля / С.Ю. Кауров, А.Л. Мигунов, В.А. Юдин, 2015.

15. *Мигунов А.Л., Кауров С.Ю.* Моделирование работы электропусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Вестник транспорта Поволжья. – Самара, 2013. – № 1. – С. 49–57.

Статья поступила в редакцию 3 июля 2020 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF BRUSHLESS GENERATOR WITH INTEGRATED EXCITER

Yu.V. Zubkov, S.Yu. Kaurov, V.E. Vereshagin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper studies an integrated starter-generator based on a synchronous machine with PM excitation (ISG), used to start an internal combustion engine (ICE) of an autonomous energy facility or vehicle and supply electric energy to its consumers. The purpose of the work is to obtain a mathematical model of the starting mode in the form of a system of differential equations, its virtualization by means of the Matlab Simulink package and a diesel engine starting simulation using ISG with the study of the starting process dynamic characteristics. It is also required to carry out experimental verification of theoretical results through field tests of a prototype starter-generator to confirm the mathematical model adequacy. Difficulties in the analysis and synthesis of ISG are due to the complexity of electromechanical energy conversion processes in it and the trapezoidal nature of the magnetic field spatial distribution in the gap, which was established when solving the magnetostatic problem by the finite element method. These features make it difficult to use traditional research methods. The mathematical model of the operation starting mode, obtained under a number of assumptions that do not affect the nature of electromechanical processes, makes it possible to investigate the ICG static and dynamic characteristics during the electric start of the internal combustion engine. The ISG start-up process simulation was carried out on the basis of equations describing the starter operation using control systems both without starting current limitation and with limitation and providing a sufficient starting torque. Modeling made it possible to determine the start duration and the change of the electromagnetic torque, inverter and winding currents. A prototype ISG was designed and manufactured. Full-scale tests of the diesel engine electric start system were carried out. The results obtained confirmed the adequacy of the developed mathematical model and the possibility of its use in the study of the ISG other specific operating modes.*

Keywords*: integrated starter-generator, mathematical model, simulation, experimental research.*

REFERENCES

1. *Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N., Gulyayev I.V.* Analysis of the Characteristics of an Electromechanical Starter in a Gas Turbine Plant // Elektrotekhnika, 2019. no. 7. Pp. 24–32 (In Russian).
2. *He Ch., Wu Th.* Analysis and Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor and Generator // Ces transactions on electrical machines and systems. 2019. vol. 3. № 1. P. 94–100.
3. *Zhu X., Hua W., Wang B., Dai N.* Comparison of stator- and rotor-surface-mounted PM brushless machines // IET Electric Power Applications. 2020, vol. 14, № 1. P. 62–70.

Yuri V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Sergey Yu. Kaurov, Postgraduate Student.
Vladislav E. Vereshagin, Postgraduate Student.

4. *Gandzha S.A., Yerlysheva A.V.* Starter-generator dlya avtonomnykh istochnikov elektrosnabzheniya // Vestn. Yuzhn.-Ural. Gos. Un-ta. 2005. no. 9. Pp. 84–86 (In Russian).
5. *Kuznetsov V.A., Nikolayev V.V.* Design strategy for the valve starter generator // Elektrotekhnika. 2005. no. 4. Pp. 46–50 (In Russian).
6. *Leonardi F., Degner M.* Integrated Starter Generator Based HEVs: A Comparison Between Low and High Voltage Systems // IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2001. P. 622–629.
7. *Huang Po-Wei, Tsai Mi-Ching, Ubadigha Ch.* Investigation of high power density permanent magnet integrated starter-generator based on dual air-gap design // IEEE Int. Conf. of Elec. Mach. 2017. P. 609–614.
8. *Migunov A.L., Kaurov S.Yu.* Analysis and selection of promising permanent magnets for magnetic systems of starter-generator sets of passenger cars // Vestn. transporta Povolzhya. 2013. no. 1. Pp. 30–33 (In Russian).
9. *Firago B.I., Pavlyachik L.B.* Reguliruyemyye elektroprivody peremennogo toka [Variable AC Drives]. Minsk, Tekhnoperspektiva, 2006. 363 p. (In Russian).
10. *Sokolovskiy G.G.* Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem [Variable frequency AC drives]. Moscow, Akademiya, 2006. 272 p. (In Russian).
11. *Vysotskiy V.Ye., Zubkov YU.V., Tulupov P.V.* Matematicheskoye modelirovaniye i optimalnoye proyektirovaniye ventilnykh elektricheskikh mashin [Mathematical modeling and optimal design of valve electric machines]. Moscow, Energoatomizdat, 2007. 340 p. (In Russian).
12. Arnold. Magnetic technologies. http://www.arnoldmagnetics.com/permanent-magnets/ (accessed June28, 2020).
13. *Gruzkov S.A.* Elektrooborudovaniye letatelnykh apparatov, v. 1 [Aircraft electrical equipment]. Moscow, Izd.-vo MEI, 2005. 565 p. (In Russian).
14. Patent RF 2543076. Starter-generator avtomobilya */ S.Yu. Kaurov, A.L. Migunov, V.A. Yudin,* 2015 (In Russian).
15. *Migunov A.L., Kaurov S.Yu.* Modeling the operation of a car's electric starting system based on an integrated starter-generator // Vestnik transporta Povolzhya. Samara. 2013. no. 1. Pp. 49–57 (In Russian).

doi: 10.14498/tech.2020.3.9

УДК 517.977.56, 519.6, 621.785

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ*

А.В. Попов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Работа посвящена оптимальному проектированию индукционной нагревательной установки для поверхностной закалки стальных цилиндрических деталей. Стадия нагрева поверхностной индукционной закалки рассматривается в качестве объекта с распределенными параметрами, для которого неизвестными оптимизируемыми параметрами являются конструктивные характеристики индуктора. Поскольку в реальных промышленных условиях часто информация об объекте известна не полностью, основные параметры могут задаваться с точностью до диапазона значений их возможных изменений. В работе формулируется задача оптимального проектирования нагревателя в условиях интервальной неопределенности начальной температуры обрабатываемой детали и комплексного коэффициента теплоотдачи с поверхности (учитывающего лучистый и конвективный теплообмен). Сформулированная задача решается с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами на базе численной модели процесса нагрева, разработанной в конечно-элементном программном пакете Altair FLUX.*

Ключевые слова: *поверхностная закалка, индукционный нагрев, оптимальное проектирование, альтернансный метод, интервальная неопределенность, численная модель, взаимосвязанные электромагнитные и тепловые поля, Altair FLUX.*

Введение

Индукционная закалка в настоящее время широко используется в технологических процессах термической обработки металлов. Конечной целью индукционной закалки является получение определенных изменений в микроструктуре обрабатываемого материала с целью его упрочнения, повышения сопротивления изнашиванию или усталостному разрушению. Часто такие изменения структуры металла требуется получить по всему объему обрабатываемой детали, для чего применяется сквозная индукционная закалка. В случаях, когда необходимо упрочнить только поверхностный слой изделия без изменения свойств сердцевины, применяется поверхностная индукционная закалка [1].

В работе рассматривается процесс поверхностной индукционной закалки стальных заготовок, который в самом общем случае состоит из трех стадий: нагрева поверхностного слоя детали выше критической температуры аустенитного превращения, выдерживания для получения однородной аустенитной

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №20-08-00240 и №19-08-00232.*

Попов Антон Валерьевич, аспирант, старший преподаватель кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

структуры и резкого охлаждения нагретого слоя ниже температуры образования мартенсита [2]. Основной целью поверхностной закалки является получение в обрабатываемом слое однородной мартенситной структуры равномерной глубины, которая зависит от равномерности нагрева границы закаливаемого слоя на первой стадии. Поэтому главной задачей стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки можно считать получение максимальной равномерности температурного поля в закаливаемом слое заготовки.

Во многих случаях для обеспечения требуемого температурного профиля в упрочняемом слое оказывается недостаточным использование типовых индукционных нагревательных установок, поэтому актуальной становится задача оптимизации конструктивных характеристик индуктора. Кроме того, в реальных промышленных условиях точные значения основных характеристик процесса индукционной закалки практически всегда неизвестны, однако возможно определить некоторые диапазоны изменения их допустимых значений. В связи с этим существенный интерес приобретает задача оптимального проектирования индукторов для стадии нагрева процесса поверхностного упрочнения стальных деталей в условиях интервальной неопределенности основных параметров, которая решается в данной работе.

Постановка задачи оптимального проектирования в условиях интервальной неопределенности

В работе рассматривается задача оптимального проектирования двухвиткового индукционного нагревателя для реализации стадии нагрева поверхностной индукционной закалки стальных заготовок цилиндрической формы, неизвестными оптимизируемыми параметрами которой могут являться конструктивные параметры индукционной нагревательной установки и характеристики источника питания, объединенные в вектор $\bar{P}$ [3]. В данном случае компонентами этого вектора являются: размер витка индуктора квадратного сечения ($p_1 \times p_1$), расстояние между заготовкой и индуктором (p_2), расстояние между витками (p_3) и ток источника питания ($p_4 = I$) (рис. 1).

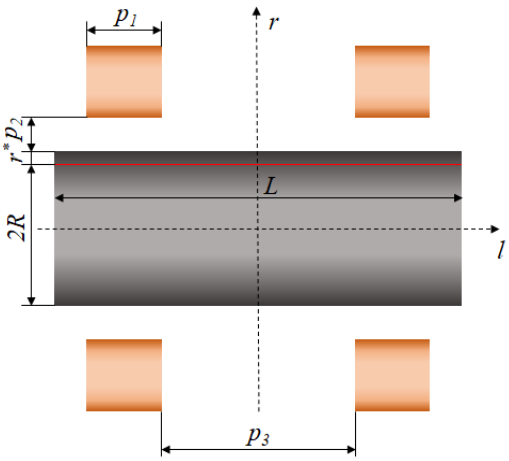


Рис. 1. Геометрия индукционной системы

На искомые параметры накладываются следующие ограничения:

$$p_{1min} \le p_1 \le p_{1max},\ p_{2min} \le p_2 \le p_{2max},\ p_{3min} \le p_3 \le p_{3max},\ I_{min} \le I \le I_{max}. \qquad (1)$$

Рассматриваемая стадия нагрева представляет собой объект с распределенными параметрами, функцией состояния которого является пространственно-временное распределение температуры по объему нагреваемой детали T (r, l, t), описываемое двумерной системой нелинейных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и температурного полей [4–6]:

$$rot\bar{H} = \sigma(T)\bar{E}, \qquad (2)$$

$$rot\bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \qquad (3)$$

$$div\bar{B} = 0, \qquad (4)$$

$$div\bar{E} = 0, \qquad (5)$$

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T(r,l,t)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T) r \frac{\partial T(r,l,t)}{\partial r}\right) + \\ + \frac{\partial}{\partial l}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(r,l,t)}{\partial l}\right) + \frac{1}{\sigma(T)}\left(\frac{\partial H(r,l,t)}{\partial r}\right)^2 \qquad (6)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(r,l,t) = T(r,l,0) = T_0(r,l) = T_0 = const,\ l \in [0;L], r \in [0;R]; \qquad (7)$$

$$\frac{\partial H(0,l,t)}{\partial r} = 0; H(R,l,t) = H_L; H(r,0,t) = H_{R1}; H(r,L,t) = H_{R2}; \qquad (8)$$

$$\frac{\partial T(0,l,t)}{\partial r} = 0;\ \lambda(T)\frac{\partial T(R,l,t)}{\partial r} = \alpha(T)\left(T(R,l,t) - T_a\right); \qquad (9)$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T(r,0,t)}{\partial l} = \alpha(T)\left(T(r,0,t) - T_a\right);$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T(r,L,t)}{\partial l} = \alpha(T)\left(T(r,L,t) - T_a\right). \qquad (10)$$

Здесь $\bar{H}$ – вектор напряженности магнитного поля;

$\bar{B}$ – вектор магнитной индукции;

$\bar{E}$ – вектор напряженности электрического поля;

$\sigma(T)$ – электрическая проводимость;

T – температура;

$c(T), \gamma(T), \lambda(T)$ – соответственно удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла;

– время;

$r \in [0;R], l \in [0;L]$ – соответственно радиальная и продольная пространственная координаты;

T_a – температура окружающей среды;

$\alpha(T)$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду.

В качестве оценки точности достижения заданного равномерного распределения температуры по границе упрочняемого слоя глубиной r^* предлагается выбрать максимальную величину абсолютного отклонения температуры $T\left(R-r^*,l,t^0\right)$ вдоль этой границы в конце стадии нагрева длительностью t^0 от заданного значения T^* [7]. Обычно при закаливании сталей требуется нагреть поверхностный слой изделия до температур выше критических, необходимых для образования аустенита, которые в типовых случаях составляют 850–900 °С [1–2].

В соответствии с вышеизложенным в работе рассматривается следующий критерий оптимизации конструкции индукционной нагревательной установки:

$$I\left(\overline{P}\right)=\max_{l\in[0,L]}\left|T\left(R-r^*,l,t^0,\overline{P}\right)-T^*\right|\to\min_{\overline{P}} \tag{11}$$

при $T^*=900°C$.

Поскольку в данной задаче информация об объекте оказывается неполной и некоторые основные параметры задаются с точностью до возможного диапазона их изменения, минимизируемый критерий (11) принимает следующий вид:

$$I\left(\overline{P}\right)=\max_{\overline{\beta}\in\Omega}\left|\max_{l\in[0;L]}\left|T\left(R-r^*,l,t^0\overline{P},\overline{\beta}\right)-T^*\right|\right|\to\min_{\overline{P}}, \tag{12}$$

где $\overline{\beta}$ – вектор неполностью определенных параметров [4–5].

В частном случае рассматриваемой в работе задачи с наличием интервальной неопределенности параметров стадии нагрева процесса поверхностной закалки к вектору $\overline{\beta}$ относятся: начальная температура закаливаемой детали T_0 и обобщенный коэффициент теплообмена с поверхности α (конвективного или лучистого), которые заданы с точностью до известных интервалов их изменения $\left[T_{0min};T_{0max}\right]$ и $\left[\alpha_{min};\alpha_{max}\right]$ соответственно, т. е.

$$\overline{\beta}=(T_0,\alpha);\Omega:\ T_{0min}\le T_0\le T_{0max},\alpha_{min}\le\alpha\le\alpha_{max}. \tag{13}$$

Таким образом, задача оптимального проектирования индуктора для стадии нагрева поверхностной индукционной закалки, описываемой уравнениями (2)–(6) с краевыми условиями (7)–(10), сводится к поиску таких значений вектора оптимизируемых параметров $\overline{P}=\left(p_1,p_2,p_3,I\right)$, стесненных ограничениями (1), которые обеспечивают нагрев границы закаливаемого поверхностного слоя заготовки толщиной r^* до требуемой температуры T^* за заданное время t^0 при минимальном значении критерия оптимальности (12) в условиях наличия интервальной неопределенности начальной температуры детали и коэффициента теплообмена (13).

Сформулированная задача оптимального проектирования может быть решена с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами.

Методика решения задачи оптимального проектирования с помощью альтернансного метода

Предлагаемая методика решения сформулированной задачи оптимального проектирования базируется на использовании альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами [4–5, 8–9]. Данный метод опирается на установленные универсальные свойства пространственных распределений температуры по объему заготовки в конце оптимальных процессов индукционного нагрева металла, подобные известным в математике свойствам наилучших приближений заданных функций к нулю. На этой основе производится процедура точной редукции исходной задачи оптимизации к решению трансцендентных систем уравнений, замкнутых относительно всех искомых параметров.

Оптимальным значениям параметров вектора $\overline{P}^0 = \left(p_1^0, p_2^0, p_3^0, ..., p_N^0\right)$, являющихся решением рассматриваемой задачи оптимального проектирования при наличии полной информации об объекте, отвечает пространственное распределение температур $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)$, которое должно соответствовать минимальному значению критерия оптимальности (11) [3]. Основное свойство результирующего температурного распределения $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)$ состоит в том, что число K точек l_j^0 по объему нагреваемого тела (в данном случае вдоль рассматриваемого продольного сечения при $r = r^*$), в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения конечной температуры $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)$ от требуемого значения T^*, равные ε_0, всегда оказывается не меньше числа N искомых оптимизируемых параметров [4–5]. При этом максимально допустимые отклонения $T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right) - T^*$ оказываются знакочередующимися в точках $l_j^0, j = \overline{1, K}$, где $0 \le l_1^0 < l_2^0 < ... < l_K^0 \le L$, т. е. обладают альтернансным свойством. Причем для температурного отклонения в точках с неизвестными координатами $l_m^0, m = \overline{1, K_1 < K}$ выполняются необходимые условия экстремума $\dfrac{\partial T\left(R - r^*, l, t^0, \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0.$

Вышеуказанные утверждения позволяют составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T\left(R - r^*, l_j^0, t^0, \overline{P^0}\right) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, \; j = \overline{1, K}, \overline{P^0} = \left(p_1^0, p_2^0, ..., p_N^0\right), \psi = \pm 1; \\ 0 \le l_1^0 < l_2^0 < ... < l_K^0 \le L; K = \begin{cases} N, \text{если } \varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)} \\ N+1, \text{если } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)} \end{cases}; \\ \dfrac{\partial T\left(R - r^*, l_m^0, t^0, \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0; \; m = \overline{1, K_1 < K}. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ – предельно достижимая точность нагрева в задачах с N оптимизируемыми параметрами.

Система уравнений (16) оказывается замкнутой относительно всех неизвестных, включая неизвестные параметры $p_1^0, p_2^0, ..., p_N^0$, координаты $l_j^0, j = \overline{1,K}$ и значение $\varepsilon_{\min}^{(N)}$, поэтому ее решение и будет являться решением рассматриваемой задачи оптимального проектирования.

Поскольку в работе рассматривается вектор $\overline{P}$, содержащий четыре неизвестных конструктивных параметра индукционной нагревательной установки, оказывается, что конечное температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя толщиной r^* имеет пять точек с максимальным отклонением температуры от заданного значения (рис. 2).

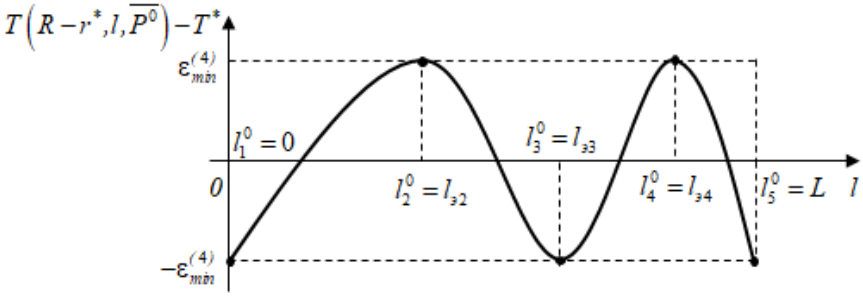


Рис. 2. Формы конечных температурных распределений для предельно достижимой точности нагрева $\overline{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$

Очевидно, что данному температурному распределению соответствует максимально достижимая точность нагрева $\overline{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$.

Система уравнений (14) в данном случае принимает следующий вид [3, 7]:

$$\begin{cases} T\left(R-r^*, l_j^0, t^0, \overline{P^0}\right)-T^* = (-1)^j \varepsilon_{\min}^{(4)}, \; j=\overline{1,5}, \overline{P^0} = \left(p_1^0, p_2^0, p_3^0, p_4^0\right); \\ 0 \le l_1^0 < l_2^0 < l_3^0 < l_4^0 < l_5^0 \le L; \\ \dfrac{\partial T\left(R-r^*, l_m^0, t^0, \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0; \; m = \overline{2,4}. \end{cases} \tag{15}$$

Рассмотрим теперь задачу оптимизации конструкции индукционного нагревателя в случае, когда информация об объекте неполная, т. е. основные параметры стадии нагрева заданы с точностью до возможных интервалов их допустимых значений.

Пусть согласно (13) имеется некоторый векторный параметр $\overline{\beta}$, который обозначает совокупность любых фиксированных значений не полностью определенных характеристик индукционной системы.

Сложность данной задачи по сравнению с задачей с полной информацией об объекте заключается в необходимости рассматривать максимум температурных

отклонений на множестве допустимых значений вектора $\overline{\beta}$ вместо пространственной координаты l. В [4] показано, что основные свойства конечного температурного поля, описанные в системе уравнений (16), распространяются и на рассматриваемую задачу с не полностью определенными характеристиками исследуемого объекта. Характерной особенностью данной задачи является то, что $T\left(\overline{\beta},\overline{P}\right)$ для каждого $\overline{P}$ представляет собой не просто конечное температурное распределение, а совокупность таких распределений температуры по пространственной координате l для всех возможных реализаций неопределенных факторов T_0 и α.

Вышесказанное означает, что температурные максимумы и минимумы могут достигаться не только в конкретно заданной точке l_j^0, а в разных точках заданного сечения нагреваемой заготовки для разных реализаций неопределенных факторов. Поскольку значения T_{0j}^0 и α для каждой из точек l_j^0 заранее не определены, возникает проблема их поиска, а также установления формы температурных распределений $T\left(\overline{\beta},\overline{P}\right)$ на множестве значений $\overline{\beta}$ с целью записи расчетных систем уравнений альтернансного метода. Указанная проблема достаточно просто решается для типичных ситуаций, когда форма кривой в задаче с полным объемом информации $T\left(R-r^*,l,\overline{P}\right)$ известна [4].

Пусть для данной задачи максимально достижимая точность нагрева обозначается через величину $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(j)}, j=\overline{1,N^*}$. Тогда каждая из величин $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(j)}$ будет определяться с помощью следующего выражения:

$$\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(j)}=\min_{\overline{P}}\left[\max_{v}\left|T\left(\overline{\beta},\overline{P}\right)-T^*\right|\right]. \qquad (16)$$

В данном случае $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(j)}$ означает максимально достижимую точность нагрева заготовки в классе задач с j оптимизируемыми параметрами на всем множестве допустимых значений начальной температуры и коэффициента теплообмена.

Таким образом, методика решения рассматриваемой задачи с интервальной неопределенностью характеристик объекта может быть описана следующим образом.

На первом этапе решается задача в предположении, что максимально достижимая точность нагрева оказывается равной $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$. Согласно [4] данное значение достигается при N=1, то есть при наличии одного неизвестного параметра вектора $\overline{P}$.

Форма кривой $T\left(R-r^*,l,\overline{P^0}\right)$ для всех возможных комбинаций значений T_0 и α для наиболее типового случая, когда тепловые потери с поверхности нагреваемого изделия довольно малы, показана на рис. 3.

Согласно (16) температурное распределение, соответствующее значению точности нагрева $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$, имеет две точки $\beta_1=\left(T_{01}^0,\alpha_1^0\right),l_1^0$ и $\beta_2=\left(T_{02}^0,\alpha_2^0\right),l_2^0$ предельно допустимого отклонения температуры от заданной в конце оптимального процесса. Поскольку форма температурного распределения $T\left(R-r^*,l,\overline{P^0}\right)$ из-

вестна и имеет вид, показанный на рис. 3, то это означает, что известны и координаты точек с максимальным отклонением $l_1^0 = 0$ и $l_2^0 = l_{э2}$ для любой фиксированной пары значений T_0 и α. Таким образом, остается только определить неизвестные значения T_{01}^0, α_1^0 и T_{02}^0, α_2^0, а следовательно, и кривые, на которых достигаются температурные экстремумы в точках $l_1^0 = 0$ и $l_2^0 = l_{э2}$ (рис. 4).

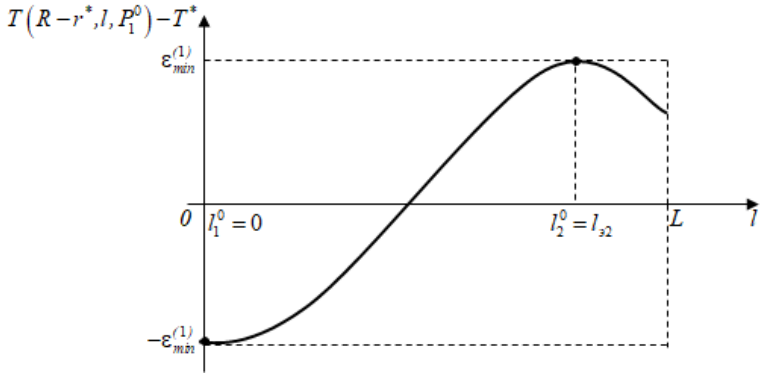


Рис. 3. Форма кривой $T\left(R - r^*, l, p_1^0\right)$ результирующего температурного распределения при точности нагрева $\bar{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$

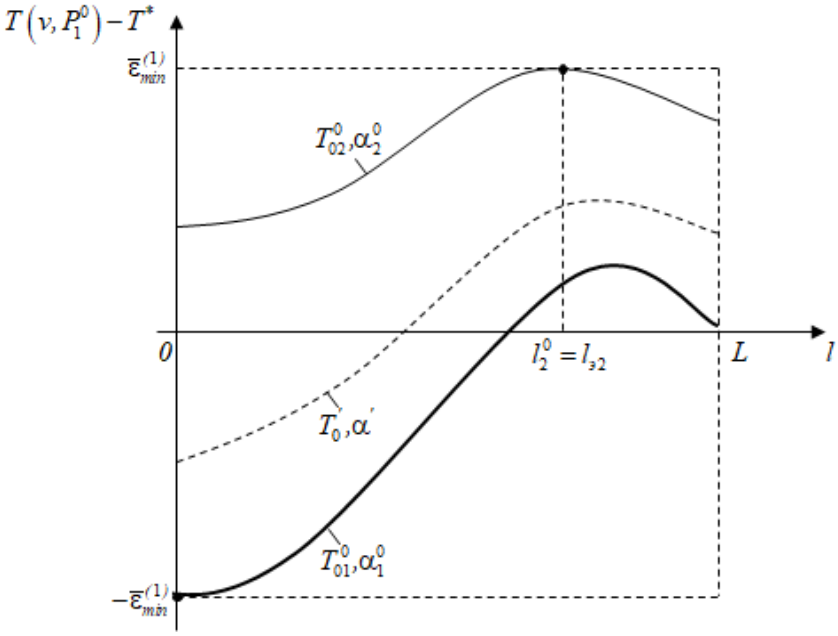


Рис. 4. Температурное распределение по пространственной координате l в конце оптимального по точности нагрева при наличии неполной информации о характеристиках объекта при $\varepsilon = \bar{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$

Из показанного графика видно, что значения T_{01}^0, α_1^0 определяют верхнюю, а значения T_{02}^0, α_2^0 – нижнюю температурную кривую соответственно. Именно между этими условными границами и будут лежать остальные кривые температурных распределений, которые соответствуют всем другим, отличным от T_{01}^0, α_1^0 и T_{02}^0, α_2^0, значениям, удовлетворяющим ограничениям (13).

Очевидно, что при одинаковой длительности оптимального процесса и значениях неизвестных параметров вектора $\overline{P}$ для всей совокупности объектов максимум температуры в точке $l_2^0 = l_{э2}$ достигается при максимально возможной начальной температуре заготовки и минимально возможном коэффициенте тепловых потерь. Минимуму температуры в точке $l_1^0 = 0$, напротив, соответствуют уже минимальная начальная температура и максимальный коэффициент тепловых потерь.

Таким образом, для точности нагрева $\varepsilon = \overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$ получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T\left(R - r^*, 0, T_{0\mathbf{min}}, \alpha_{\mathbf{max},} p_1^0\right) - T^* = -\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}; \\ T\left(R - r^*, l_2^0, T_{0\mathbf{max}}, \alpha_{\mathbf{min},} p_1^0\right) - T^* = \overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}; \\ \dfrac{\partial T\left(R - r^*, l_2^0, T_{0\mathbf{max}}, \alpha_{\mathbf{min},} p_1^0\right)}{\partial l} = 0. \end{cases} \tag{17}$$

Данная система оказывается замкнутой и может быть решена относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым относятся p_1^0, l_2^0 и $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$.

В случае, когда вектор конструктивных параметров $\overline{P}$ имеет более одной компоненты, необходимо перейти к решению задачи для нового значения точности нагрева $\varepsilon < \overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$. Для этого решают последовательность задач для ряда значений $\varepsilon = \varepsilon'$, уменьшающихся с малым шагом от $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(1)}$. При этом для каждого значения точности нагрева необходимо задаваться формой температурного распределения, соответствующей данному значению. Подробно алгоритм решения данной задачи описан в [4].

Вновь принимая во внимание тот факт, что максимальная температура в конце оптимального процесса достигается при минимальном коэффициенте потерь и максимальной начальной температуре, а минимумы – при максимальном коэффициенте потерь и минимальной начальной температуре, для сформулированной задачи при $N = 4$ можно составить расчетную систему уравнений альтернансного метода, подобно выражению (15).

Система (18), состоящая из восьми уравнений, вновь оказывается замкнутой относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым относятся: четыре компонента вектора оптимизируемых конструктивных параметров $\overline{P^0}$, три координаты точек с максимальным отклонением температуры от заданной l_2^0, l_3^0, l_4^0 и значение точности нагрева $\overline{\varepsilon}_{\mathbf{min}}^{(4)}$, и, следовательно, может быть решена относительно рассматриваемых неизвестных.

$$\begin{cases} T\left(R-r^*, l_i^0, T_{0\min}, \alpha_{\max,} \overline{P^0}\right) - T^* = -\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}, i = 1,3,5; \\ T\left(R-r^*, l_j^0, T_{0\max}, \alpha_{\min,} \overline{P^0}\right) - T^* = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}, j = 2,4; \\ \dfrac{\partial T\left(R-r^*, l_3^0, T_{0\min}, \alpha_{\max,} \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0, 0 = l_1^0 < l_2^0 < \ldots < l_5^0 = L; \\ \dfrac{\partial T\left(R-r^*, l_k^0, T_{0\max}, \alpha_{\min,} \overline{P^0}\right)}{\partial l} = 0, k = \overline{2,4}. \end{cases} \quad (18)$$

Численное решение задачи и анализ полученных результатов

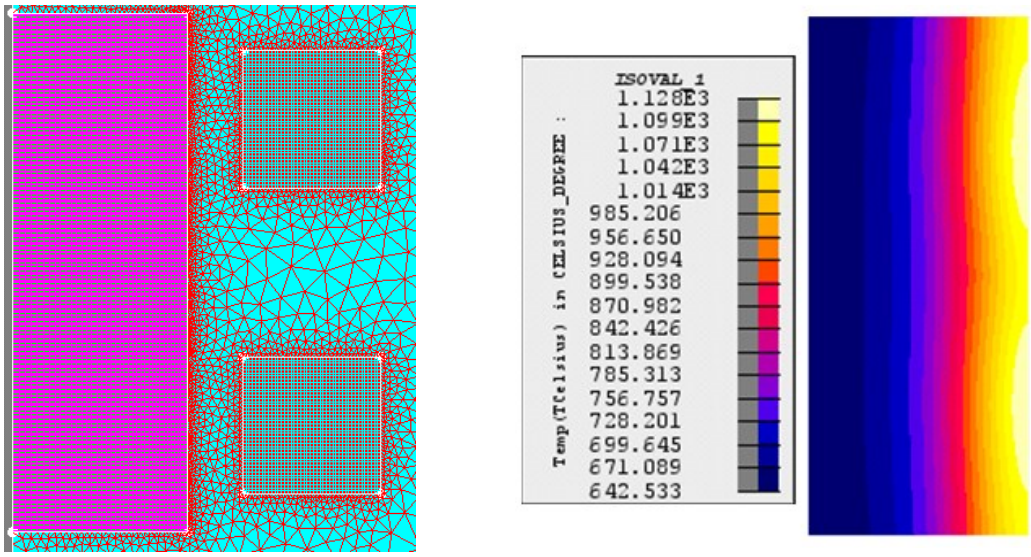
Для численного решения сформулированной задачи оптимального проектирования в программном пакете FLUX была разработана нелинейная двумерная модель индукционной нагревательной системы для закалки стальной цилиндрической заготовки [10–12]. Исходные данные для моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для построения модели

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Частота питающего тока	f	100000	Гц
Требуемая температура заготовки	T^*	900	°С
Температура окружающей среды	$T_{окр}$	20	°С
Начальная температура заготовки	T_0	20	°С
Количество витков индуктора	N	2	
Радиус заготовки	RB	14	мм
Длина заготовки	LB	32,9	мм
Время нагрева	t	8	с
Толщина закаливаемого слоя	r^*	4	мм
Материал заготовки		Сталь (С40) [13]	

Общий вид FLUX модели рассматриваемой индукционной нагревательной системы со сгенерированной конечно-элементной сеткой и результирующее температурное поле по длине заготовки показаны на рис. 5.



а *б*

Рис. 5. Численная FLUX модель нагревательной системы
а – конечно-элементная сетка; *б* – температурное поле по длине заготовки
в конце нагрева

Рассмотрим сначала решение задачи оптимального проектирования с полной информацией об объекте, когда начальная температура заготовки и коэффициент лучистого теплообмена принимают заранее известные фиксированные значения. В частном случае эти коэффициенты соответственно равны:

$$T_0 = 20°C; \alpha_u = 0.85 \frac{Вт}{м^2 \cdot {}^0C^4}.$$

На неизвестные оптимизируемые параметры конструкции индукционной нагревательной установки накладываются следующие ограничения:

$$5 \le p_1 \le 15, 2 \le p_2 \le 10, 3 \le p_3 \le 15, 500 \le I \le 1500. \quad (19)$$

В табл. 2 приведены заданные начальные и оптимальные значения всех неизвестных параметров, найденные в результате решения системы уравнений (15).

Таблица 2

Результаты решения задачи оптимального проектирования без учета интервальной неопределенности

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Начальное значение	12 мм	3 мм	4,45 мм	1220 А	–
Оптимальное значение	11,9 мм	3 мм	4,4 мм	1382 А	11,5 °С

Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева в индукционной нагревательной установке оптимальной конструкции показано на рис. 6.

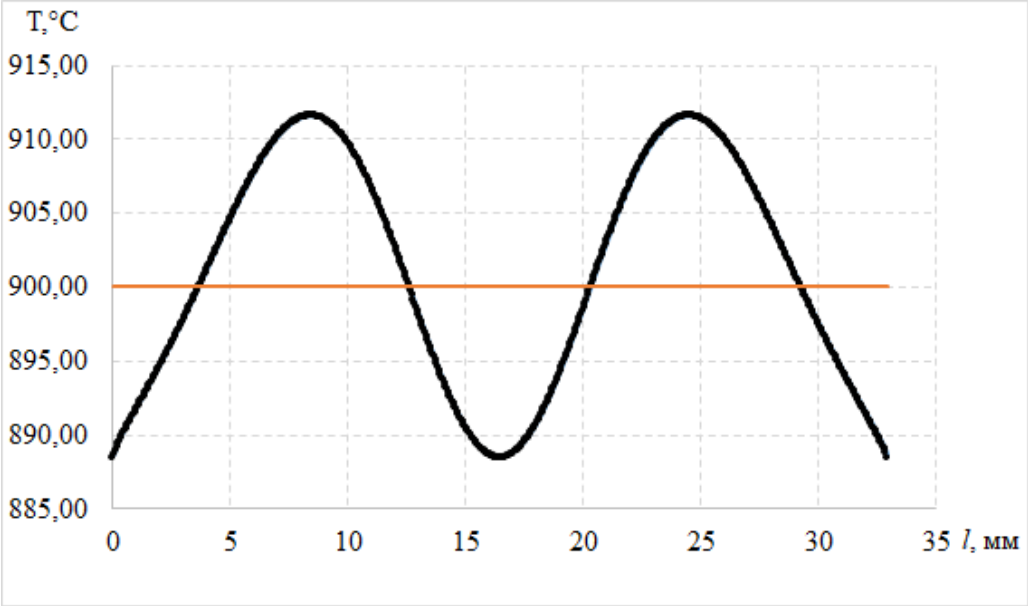


Рис. 6. Конечное температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя толщиной r^*

Отметим, что в [14] показано, что полученные при решении альтернансным методом результаты совпадают с результатами, найденными при использовании генетических алгоритмов оптимизации.

Рассмотрим теперь случай, когда начальная температура заготовки и коэффициент лучистого теплообмена задаются с точностью до следующих интервалов возможного изменения их значений:

$$0.5 \le \alpha_u \le 1.3; 15 \le T_0 \le 25. \qquad (20)$$

Ограничения на оптимизируемые параметры дизайна индуктора, а также их начальные приближения совпадают со значениями, использованными при решении задачи с полным объемом информации об объекте.

Значения оптимизируемых параметров, найденные в результате решения системы уравнений (18), представлены в сравнении с решением задачи оптимального проектирования без учета интервальной неопределенности в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение оптимальных значений конструктивных параметров индуктора в задаче с полной информацией об объекте и в условиях интервальной неопределенности

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Задача с полной информацией	11,9 мм	3 мм	4,4 мм	1382 А	11,5 °С
Задача с интервальной неопределенностью	12,2 мм	3,6 мм	4,1 мм	1417 А	16,9 °С

Как уже было отмечено, температурные максимумы и минимумы достигаются в точках $l_j^0, j = \overline{1,5}$, расположенных на границе закаливаемого слоя в разных сечениях нагреваемой заготовки, координаты которых зависят от конкретных

реализаций неопределенных факторов. При этом максимальные отклонения температуры от заданной достигаются при максимальном значении начальной температуры заготовки и минимальном значении коэффициента теплообмена, а минимальные температурные отклонения наблюдаются при минимальном значении температуры и максимальном значении коэффициента тепловых потерь.

Таким образом, в результате решения рассматриваемой задачи получены температурные распределения для сечений с точками максимума и минимума температуры (рис. 7).

На рис. 7 кривая 1 соответствует максимальной начальной температуре $T_{0max} = 25°C$ и минимальному значению коэффициента потерь $\alpha_u = 0.5 \frac{Вт}{м^2 \cdot {}^0C^4}$, кривая 2 – минимальной начальной температуре $T_{0max} = 15°C$ и максимальному значению коэффициента потерь $\alpha_u = 1.3 \frac{Вт}{м^2 \cdot {}^0C^4}$.

Сравнение полученных результатов с результатами, полученными при решении задачи оптимального проектирования с полным объемом информации (см. табл. 3), показало, что введение интервальной неопределенности привело к увеличению максимального отклонения температуры от требуемого на 5 °С. Подобное снижение точности нагрева объясняется тем, что при решении задачи с не полностью определенными параметрами исследуемого объекта получены результаты, соответствующие наихудшей комбинации неопределенных факторов, к которым относятся начальная температура обрабатываемой заготовки и коэффициент тепловых потерь излучением.

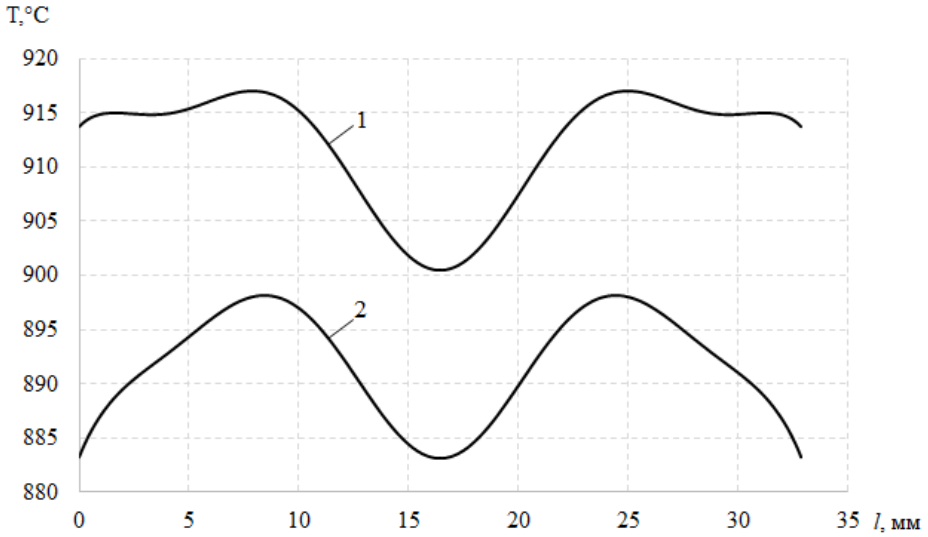


Рис. 7. Температурные распределения в задаче оптимального проектирования в условиях наличия интервальной неопределенности:
1 – в сечении с максимальными температурами;
2 – в сечении с минимальными температурами

Заключение

В работе рассмотрена задача оптимального проектирования нагревательной установки для реализации стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки стальных заготовок в условиях интервальной неопределенности начальной температуры детали и коэффициента лучистого теплообмена. Предложена методика решения сформулированной задачи с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации. Приведены результаты численных расчетов на базе двумерной численной модели, построенной в программном пакете Altair FLUX.

Представленные расчеты показали, что введение интервальной неопределенности приводит к увеличению максимального отклонения температуры вдоль границы закаливаемого слоя заготовки от требуемого значения на 5 °С, что составляет менее 1 % от заданной температуры 900 °С. Подобное снижение точности нагрева является допустимым для технологии индукционной закалки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of Induction Heating. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. 797 p.
2. *Блантер М.Е.* Металловедение и термическая обработка. – М.: Машгиз, 1963. – 416 с.
3. *Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Деревянов М.Ю.* Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия «Управление, вычисл. техн. информ.». – 2019. – № 1. – С. 40–50.
4. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
5. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.
6. *Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И.* Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 148–163.
7. *Popov A.V.* Optimization of Heating Stage for Induction Hardening of Cylindrical Billets // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – Samara, Russia, 2019. – pp. 237–241.
8. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 678 с.
9. *Рапопорт Э.Я.* Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
10. Flux [Электронный ресурс]: сайт программного продукта FLUX. URL: www.altair.com/flux/ (дата обращения 01.09.2020).
11. *Шарапова О.Ю.* Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 7 (28). – С. 180–185.
12. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29,02033 (2016).
13. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

14. *Pleshivtseva Yu., Baldan M., Popov A., Nikanorov A., Rapoport E., Nacke B.* Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening // COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 39. No. 1, pp. 90–99. https://doi.org/10.1108/COMPEL-05-2019-0216.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2020 г.

OPTIMAL INDUCTOR DESIGN FOR SURFACE HARDENING UNDER CONDITIONS OF INTERVAL UNCERTAITY OF PROCESS PARAMETERS

A.V. Popov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, Russian Federation

Abstract. *The paper is devoted to the optimal inductor design for surface hardening of steel cylindrical billets. The heating stage of surface induction hardening is considered as an object with distributed parameters, which unknowns are design characteristics of the induction installation. In real industrial conditions the main technological parameters are often defined by the intervals of their possible values. That is why, in the paper the optimal design problem under the conditions of interval uncertainty of initial billet's temperature and thermal exchange coefficient is formulated. Solution of the formulated problem is carried out by alternance method of parametric optimization based on numerical model developed in Altair FLUX software.*

Keywords: *surface hardening, induction heating, optimal design, alternance method, interval uncertainty, numerical model, electromagnetic and thermal fields, Altair FLUX.*

REFERENCES

1. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of Induction Heating. – New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. – 797 p.
2. *Blanter M.E.* Metallovedenie i ternicheskaya obrabotka [Metal science and heat treatment]. Moscow: Mashgiz, 1963. 416 s.
3. *Pleshivtseva Yu.E., Popov A.V., Popova M.A., Derevyanov M.Yu.* Optimalnoye proektirovaniye induktora dlya poverkhnostnoi zakalki tsilindricheskikh zagotovok na osnove chislennoi dvumernoi modeli [Optimal inductor design for surface hardening of cylindrical billets] // Bulletin of Astrakhan State Technical Unversity. Series "Control, computer engineering, informatics". – Astrakhan, 2019. – № 1. – pp. 40–50.
4. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimalnoe upravleniye temperaturnimi rezhimami induktsionnogo nagreva [Optimal control of induction heating processes]. Moscow: Nauka, 2012. 309 p.
5. *Rapoport E.Ya.* Optimizatsiya protsessov induktsionnogo nagreva metalla [Optimization of induction heating processes]. Moscow: Metallurgiya, 1993. 279 p.
6. *Pleshivtseva Yu.E., Popov A.V., Diakonov A.I.* Dvumernaya zadacha optimalnogo po tipovim kriteriyam kachestva upravleniya protsessom skvoznogo induktsionnogo nagreva [Two-dimensional problem of optimal with respect to typical quality criteria control of through induction heating processes] // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. Samara, 2014. № 2(42). pp. 148–163.
7. *Popov A.V.* Optimization of Heating Stage for Induction Hardening of Cylindrical Billets // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – Samara, Russia, 2019. pp. 237–241.

Anton V. Popov, Senior Lecturer.

8. *Rapoport E.Ya.* Optimalnoe upravleniye sistemami s raspredelennimi parameterami [Optimal control of systems with distributed parameters]. – Moscow: Visshaya shkola, 2009. 678 p.
9. *Rapoport E.Ya.* Alternansniy metod v prikladnikh zadachakh optimizatsii [Alternance method in applied optimization problems]. Moscow: Nauka, 2000. 336 p.
10. Flux [electronic source]: www.altair.com/flux/ (accessed 01.09.2020).
11. *Sharapova O.Yu.* Chislennoye modelirovaniye protsessa periodicheskogo induktsionnogo nagreva na baze konechno-elementnogo programmnogo paketa FLUX [Numerical simulation of static induction heating process based on finite-element software FLUX] // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. Samara, 2011. № 7 (28). pp. 180–185.
12. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A*. MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29,02033 (2016).
13. Marochnik staley i splavov 2-e izdaniye [Grade guide of steels and alloys. Second edition] / A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Yu. V. Kashirskiy et al. – Moscow: Mashinostroyeniye, 2003. 784 p.
14. *Pleshivtseva Yu., Baldan M., Popov A., Nikanorov A., Rapoport E., Nacke B.* Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening // COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 39 No. 1, pp. 90–99.

doi: 10.14498/tech.2020.3.10

В порядке дискуссии

УДК 621.391.1

О НЕДОСТАТКАХ КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Б.Я. Лихтциндер

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23

E-mail: lixt@psuti.ru

Аннотация. *Рассматриваются особенности существующей классификации систем массового обслуживания, показаны ее недостатки. Основным недостатком является отсутствие информации о корреляционных и взаимно корреляционных свойствах потоков. Недостатком обозначений Кендалла является также отсутствие возможности классификации систем по характеру изменения входной нагрузки.*

Ключевые слова: *классификация Кендалла, потоки заявок, очереди, корреляция, загрузка, распределения.*

Введение

Существует множество моделей систем массового обслуживания (СМО). Для них были разработаны различные принципы классификации. Более пятидесяти лет назад была предложена классификация Д. Кендалла [1], основанная всего на трех символах. Для описания СМО использовалась запись следующего вида:

$$A/B/n.$$

Первый символ определяет характер входящего потока заявок. Распределение длительности обслуживания заявок идентифицируется вторым символом. Величина n указывает на количество обслуживающих приборов. В дальнейшем, указанная классификация была модифицирована отечественным ученым Г.П. Башариным [2], и включает следующую последовательность символов:

$$A/B/S,K,N,f,z,$$

где A – закон распределения промежутков между вызовами входящего потока;

B – закон распределения времени обслуживания вызовов;

S – структура коммутационной системы;

K – максимальное состояние системы;

Лихтциндер Борис Яковлевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Сети и системы связи».

N – число источников нагрузки;
f – приоритетность обслуживания;
z – число мест для ожидания.

Если символы K, N, z в обозначении модели отсутствуют, то они по умолчанию не ограничены. Первые два символа A и B могут характеризовать следующие законы распределения: M – показательное; D – равномерной плотности (постоянное); G – произвольное (general). Если вместо символа S изображен символ V, то коммутационная система однозвенная полнодоступная. Отсутствие символа f означает, что постановка вызовов в очередь и выборка вызовов из очереди на обслуживание осуществляется без приоритетов

Однако, указанные классификации имеют один общий недостаток. Все рассматриваемые в них случайные величины считаются взаимно независимыми и не коррелированными. Учитываются только законы распределения вероятностей.

Корреляция

Исследования телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов показали, что потоки пакетов в таких сетях существенно отличаются от пуассоновских и носят явно выраженный пачечный характер. Пачечность потоков свидетельствует о значительной корреляционной зависимости между поступающими пакетами, и пренебрегать корреляционными свойствами такого трафика уже нельзя.

Вместе с тем, обозначения, учитывающие корреляционные свойства потоков в рассмотренной выше системе классификации, отсутствуют и потоки заявок характеризуются исключительно законами распределения интервалов между соседними заявками. (Подразумевается, что заявки являются независимыми и корреляция в потоке отсутствует). Нами было неоднократно показано, что наличие положительной корреляции в потоке заявок приводит к возникновению больших очередей, по сравнению с потоками, имеющими аналогичное распределение вероятностей интервалов времени между соседними заявками, при отсутствии корреляционной зависимости [3].

Взаимная корреляция

Классификация Кендалла четко разделяет случайные величины, характеризующие входной поток заявок (параметр A) и случайные величины, характеризующие производительность системы массового обслуживания (параметр B), считая их взаимно независимыми. В реальных сетях с пакетной коммутацией это далеко не так. Параметр B учитывает время обработки пакета τ в СМО, которое зависит не только от ее производительности, но и от размеров самого пакета, относящихся к характеристикам входного потока.

Следовательно, между указанными случайными величинами имеется весьма жесткая взаимная корреляционная связь, что противоречит ограничениям, принятым в классификации Кендалла. Наличие двух взаимно коррелированных случайных величин, одна из которых характеризует свойства входного потока, а другая – свойства СМО, существенно усложняет анализ таких систем. Стремление заменить две взаимно коррелированные случайные величины одной случайной величиной привело к созданию интервальных методов анализа процессов образования очередей в СМО [3].

В качестве такой случайной величины предлагается ввести интервальный коэффициент загрузки m_i, который представляет числа заявок, поступающих в систему в течение времени τ_i обработки одной заявки. Указанная случайная ве-

личина полностью характеризует процесс образования очередей, а ее математическое ожидание в точности равно коэффициенту загрузки СМО $\overline{m_i} = \rho$. Эта величина все чаще используется при анализе телекоммуникационного трафика [4]. Такой подход, потребует объединения первых двух позиций классификации Кендалла и введения соответствующих новых обозначений.

Заключение

В последние годы мы все чаше являемся свидетелями изменений и дополнений, вносимых специалистами в существующую классификацию Кендалла-Башарина и, по-видимому, назрела необходимость в ее модернизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kendall D.G. Some Problems in the theory of queues // Journal of Royal Statistical Society. 1951. B: V. 13. N2. P.151–173.
2. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика: М.: Изд. РУДН, 2009. 342 с.
3. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 290 с.
4. Степанов С.Н. Теория телетрафика. Концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия-Телеком. 2015. 808 с.

Статья поступила в редакцию 3 июля 2020 г.

ON DISADVANTAGES OF THE CLASSIFICATION OF QUEUING SYSTEM

B. Ya. Likhttsinder

Povolzhskiy state University of Telecommunications and Informatics,
23, L. Tolstoy st., Samara, 443010, Russian Federation

E-mail: lixt@psuti.ru

Abstract. *The features of the existing classification of queuing systems are considered, its disadvantages are shown. The main disadvantage is the lack of information about the correlation and cross-correlation properties of flows. The disadvantage of Kendall's designations is also the lack of the possibility of classifying systems by the nature of the change in the input load.*

Keywords: *Kendall classification, application flows, queues, correlation, load, distributions.*

REFERENCES

1. Kendall D.G. Some Problems in the theory of queues // Journal of Royal Statistical Society. 1951. B: V. 13. N2. P. 151–173.
2. Basharin G.P. Lectures on the mathematical theory of teletraffic: Textbook. Ed. 3rd fix. and add. M.: Publishing house RUDN, 2009. 342 p.
3. Likhttsinder B.Ya. Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design). Moscow: Hotline-Telecom, 2018. 290 p.
4. Stepanov S.N. Teorija teletrafika. Concepcion, modeli, prilozhenija [Teletraffic theory. Concepts, models, applications]. Moscow, Goryachaya liniya-Telecom Publ., 2015, 808

Boris Ya. Likhttsinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В приоритетном порядке рассматриваются материалы докторских и кандидатских диссертаций.

Требования к оформлению статей находятся
на сайте университета **http://vestnik-teh.samgtu.ru**
и на сайте **https://journals.eco-vector.com/1991-8542/**

К статье прилагаются:

– экспертное заключение;
– авторская справка;
– лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
– направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

Статьи можно передать ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Редколлегия журнала