

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 21

2020

№ 2

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:
БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.
ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.
ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН
КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН
МИКРИН Е. А., акад. РАН
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН
СИГОВ А. С., акад. РАН
СОЙФЕР В. А., акад. РАН
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:
DANIELE Z., PhD, Италия
DORANTES D. J., PhD, Турция
GROOMPOS P. P., PhD, Греция
ISIDORI A., PhD, Италия
KATALINIC B., PhD, Австрия
LIN CH.-Y., PhD, Тайвань
MASON O. J., PhD, Ирландия
ORTEGA R. S., PhD, Франция
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США
STRZELECKI R. M., PhD, Польша
SUBUDHI B. D., PhD, Индия
АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан
ГАРАШЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина
ТРОФИМЕНКО Е. Е., д.т.н., Беларусь
БОБЦОВ А. А., д.т.н.
БУКОВ В. Н., д.т.н.
ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.
ЖУКОВ И. А., д.т.н.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.
ЛОХИН В. М., д.т.н.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д.ф.-м.н.
ПУТОВ В. В., д.т.н.
ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.
РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.
ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.
ФУРСОВ В. А., д.т.н.
ЮРЕВИЧ Е. И., д.т.н.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:
АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Жмудь В. А., Востриков А. С., Ивойлов А. Ю., Саблина Г. В. Синтез робастных ПИД регуляторов методом двойной оптимизации 67

Карсаев О. В. Модификация CGR-алгоритма маршрутизации данных в коммуникационной сети группировки спутников 75

Шибанов Г. П. Автоматизированный контроль авиадвигателей в условиях их стендовых испытаний 86

Sergeev S. F. Artificial Intelligence in Mechatronic Systems: Problems of Embodiment 93

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Тагирова К. Ф., Нугаев И. Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин 102

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Иванов В. М. Имитационная модель системы стабилизации скорости резания для металлорежущих станков с ЧПУ 110

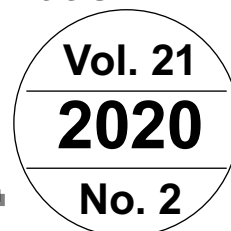
ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и исследование математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть II 117

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в БД RSCI на платформе Web of Science.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

MIKRIN E. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DANIELE Z., PhD, Italy

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

PAVLOVSKY V. E.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

YUREVICH E. I.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

Zhmud V. A., Vostrikov A. S., Ivoilov A. Yu., Sablina G. V. Synthesis of Robust PID Controllers by Double Optimization Method 67

Karsaev O. V. Modification of the CGR-Algorithm on Data Routing in a Communication Network of Satellite Constellation 75

Shibanov G. P. Automatic Control of Aircraft Engine in Conditions of Stand Test 86

Sergeev S. F. Artificial Intelligence in Mechatronic Systems: Problems of Embodiment 93

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

Tagirova K. F., Nugaev I. F. Actual Tasks of Oil-Wells Electric Submersible Pump Control Automation 102

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Ivanov V. M. Simulation Model of the Cutting Speed Stabilization System for CNC Metal-Cutting Machine Tools 110

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part II 117

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

В. А. Жмудь, д-р техн. наук, зав. каф., oao_nips@bk.ru,
А. С. Востриков, д-р техн. наук, проф., a.s.vostrikov@gmail.com,
А. Ю. Ивойлов, аспирант, iau13hv@mail.ru,

Г. В. Саблина, канд. техн. наук, доц., sablina@corp.nstu.ru,
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Синтез робастных ПИД регуляторов методом двойной оптимизации

Проектирование адаптивных регуляторов позволяет решать задачу управления объектом с нестационарными параметрами. Однако если параметры объекта изменяются не слишком сильно или если известен лишь некоторый интервал их изменения, может оказаться, что адаптивный регулятор не требуется, поскольку задача может быть решена с помощью робастного регулятора. Робастный регулятор позволяет обеспечить приемлемое качество управления даже в том случае, если параметры математической модели объекта изменяются в некотором наперед заданном интервале. Известен способ проектирования таких регуляторов методом численной оптимизации ансамбля регуляторов, используемых в ансамбле систем, в которых модели объектов различны, а модели регуляторов идентичны. При этом в ансамбле используются модели объектов с крайними значениями параметров. Недостаток этого метода состоит в слишком большом числе систем, которые требуется одновременно моделировать и оптимизировать, если изменяемых параметров несколько. Кроме того, наихудшее сочетание параметров модели может быть не граничным, а серединным, в этом случае данный метод не применим. В данной статье авторы предлагают и анализируют на численном примере альтернативный метод проектирования робастного регулятора. Суть данного метода заключается в численной оптимизации регулятора для модели с наихудшим сочетанием значений всех изменяемых параметров. Поиск наихудшего сочетания параметров осуществляется также с помощью метода численной оптимизации. При этом отыскивается такое сочетание параметров модели, при котором наилучшее соотношение коэффициентов регулятора дает наихудший результат работы системы. Задача решается в несколько циклов оптимизации с чередованием целевых функций. Целевая функция представляет собой некоторую интегральную оценку ошибки управления в системе, ее вид определяется решаемой задачей. Полезность предложенного метода проиллюстрирована численно на примере динамического объекта третьего порядка с последовательно включенным звеном запаздывания.

Ключевые слова: численная оптимизация, регулирование, робастная система, симуляция, моделирование, математическая модель, объект, ПИД регулятор

Введение

Актуальность задачи проектирования робастных регуляторов подтверждается большим числом публикаций на эту тему [1–37]. Такие регуляторы позволяют управлять объектами даже в том случае, когда параметры их математических моделей не известны точно или изменяются в некоторых пределах, но при условии, что границы изменения каждого из параметров известны. Задача отыскания робастного регулятора для каждого конкретного случая может оказаться невыполнимой, и в этом случае необходимо использовать адаптивный регулятор. Если же робастный регулятор существует, необходима методика его расчета, т. е. расчета всех коэффициентов этого регулятора.

Задача отыскания структуры регулятора в данной статье не рассматривается, поскольку ПИД регуляторы являются наиболее универ-

сальными структурами, адекватными поставленной задаче в большинстве случаев. Наличие оснований для предпочтения других структур регулятора не меняет сути предлагаемой и исследуемой методики расчета его коэффициентов.

Наиболее эффективный подход к отысканию коэффициентов регулятора для интервально заданных моделей объекта базируется на численной оптимизации [37]. Для того чтобы принять в расчет все известные сочетания параметров модели объектов, могут использоваться несколько подходов.

Первый подход состоит в том, что при оптимизации одновременно используются несколько моделей объекта с различными фактическими значениями параметров его модели [37].

При этом моделируется столько моделей системы, сколько используется различных сочетаний параметров, но в каждой системе модель регулятора всегда одна и та же, а коэффици-

енты этой модели отыскиваются методом численной оптимизации.

Целевая функция представляет собой интегральную оценку всех модулей ошибки во всех моделируемых системах, также целевая функция может иметь дополнительные члены для улучшения процедуры поиска.

Таким образом, моделируется ансамбль систем с идентичными регуляторами в целях отыскания регулятора, дающего минимум суммы всех частных целевых функций, характеризующих качество каждой моделируемой системы. Структурная схема проекта для этого метода решения показана на рис. 1.

Недостатком этого подхода является излишняя сложность проекта для моделирования: при двух параметрах требуется одновременное использование не менее чем четырех моделей, при трех параметрах требуется восемь моделей, при N изменяемых параметрах модели требуется 2^N моделей. Но и в этом случае число моделей недостаточно для полной уверенности в правильности результата, поскольку при этом проверяются только граничные точки интервалов изменения всех параметров, тогда как может оказаться, что наилучшим сочетанием параметров объекта является некоторое сочетание, не являющееся граничным.

Второй подход состоит в том, что параметры модели объекта медленно изменяются в соответствии с некоторой периодической зависимостью. Это обеспечивает постепенное изменение параметров во всем диапазоне допустимых значений, поэтому численная оп-

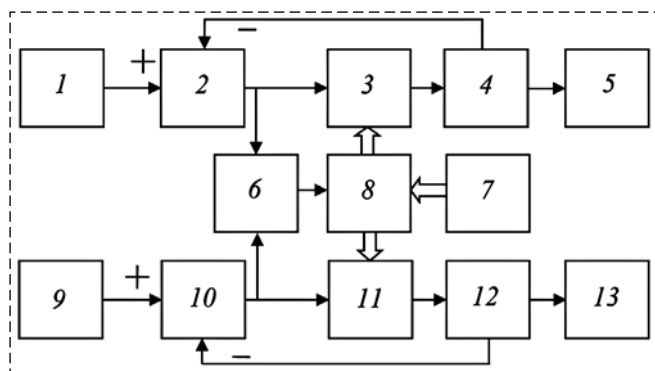


Рис. 1. Проект для оптимизации регулятора:

1, 9 — формирователь задания; 2, 10 — вычитающий элемент; 3, 11 — идентичные перестраиваемые модели регулятора; 4, 12 — различные модели объекта; 5, 13 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор

Fig. 1. The project for regulator optimization:

1, 9 — the setpoint former; 2, 10 — the subtraction element; 3, 11 — the identical tunable models of regulator; 4, 12 — the different models of the object; 5, 13 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer

тимизация должна теоретически давать такой результат настройки регуляторов, при котором система будет оставаться устойчивой при всех параметрах ее модели, которые были использованы в ходе моделирования. Структурная схема проекта для этого метода решения показана на рис. 2.

Недостатком такой системы является требование длительного времени моделирования для того, чтобы перебором испробовать все возможные сочетания параметров объекта.

Третий подход может быть синтезирован из комбинации первых двух, а именно: может быть одновременно реализовано несколько моделей, но их недостаточное число может быть восполнено тем, что один или несколько параметров модели при этом все же медленно меняются, тогда как другие параметры зафиксированы в своих крайних значениях, что и дает некоторое сокращение времени моделирования.

Предполагается, что третий подход объединяет достоинства первых двух подходов и свободен от их недостатков. На практике же может оказаться, что третий (комплексный) подход объединяет недостатки первых двух подходов и свободен от их достоинств, поскольку при этом требуется и более сложная модель для моделирования (чем при втором подходе) и более длительное время моделирования (чем при первом подходе). В статье решается задача отыскания альтернативного метода проектирования робастного регулятора, который бы в действительности отличался от известных методов в лучшую сторону.

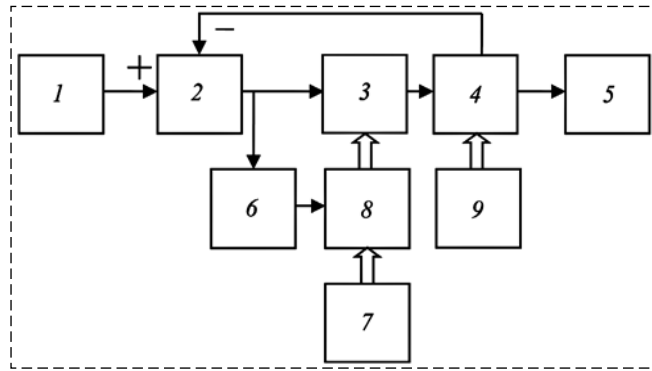


Рис. 2. Проект для оптимизации регулятора:

1 — формирователь задания; 2 — вычитающий элемент; 3 — перестраиваемая модель регулятора; 4 — перестраиваемая модель объекта; 5 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор; 9 — сканирующий генератор

Fig. 2. The project for regulator optimization:

1 — the setpoint former; 2 — the subtraction element; 3 — the tunable regulator model; 4 — the tunable object model; 5 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer; 9 — the scanning generator

Предлагаемый метод решения

Предлагается новый метод отыскания робастной настройки, основанный на численной оптимизации регулятора для наихудшей модели объекта, т. е. для наихудшего сочетания всех изменяемых параметров. Поиск наихудшей модели выполняется методом численной оптимизации, при этом отыскивается сочетание параметров модели, при котором наилучший регулятор дает наихудший результат. Задача решается в несколько циклов оптимизации с чередованием целевых функций. Методика проиллюстрирована численным примером. Прежде чем описывать предлагаемый алгоритм, дадим несколько определений.

Фиксированные параметры (ФП) — те параметры, которые в данной серии экспериментов по моделированию и оптимизации задаются фиксированными значениями. Неизвестные параметры (НП) — те параметры, которые программа моделирования отыскивает в результате серии экспериментов по моделированию в целях минимизации стоимостной функции (СФ). Результаты поиска (РП) — найденные значения для НП по окончании серии экспериментов.

Возможным алгоритмом поиска может служить, например, следующий вариант:

1. Отыскание лучшего регулятора для усредненной модели объекта. Создается модель системы из регулятора с НП и объекта с ФП. При этом ФП модели объекта берутся из середины каждого интервала их возможных изменений. Для получения РП используется метод численной оптимизации при заданной целевой функции F_1 .

2. Отыскание худшего объекта для найденного регулятора. Формируется модель системы из регулятора с ФП и объекта с НП, причем РП из пункта 1 используются как ФП регулятора. Применяется метод численной оптимизации по заданной целевой функции F_2 .

3. Отыскание лучшего регулятора для худшего объекта. Создается модель системы, состоящая из регулятора с НП и объекта с ФП, причем РП из пункта 2 используются как ФП объекта. Применяется метод численной оптимизации по заданной целевой функции F_1 . Проверяется критерий остановки поиска. Если критерий не достигнут, пункты 2 и 3 повторяются с вновь найденными НП, если он достигнут, осуществляется переход к следующему пункту.

4. Верификация результата. Проводится тестирование качества системы с найденным регулятором для всех сочетаний параметров

модели, найденных на предыдущих стадиях поиска. Если переходные процессы во всех случаях удовлетворительны, задача считается решенной. Если хотя бы один процесс неудовлетворителен, проверяется критерий окончания поиска, если он не достигнут, поиск продолжается с пункта 2, если он достигнут, поиск прекращается, задача считается не решенной.

Структурная схема проекта для решения поставленной задачи

На рис. 3 показана структурная схема проекта для первого этапа решения поставленной задачи, на рис. 4 приведена структурная схема проекта для второго этапа решения задачи.

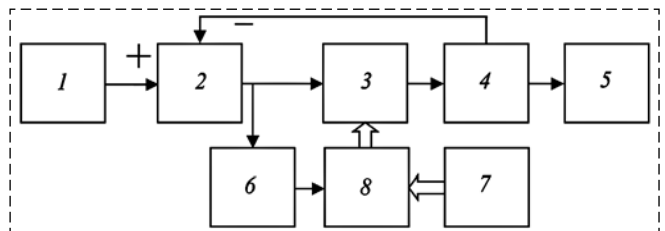


Рис. 3. Проект для реализации первого этапа оптимизации регулятора:

1 — формирователь задания; 2 — вычитающий элемент; 3 — перестраиваемая модель регулятора; 4 — модель объекта со средними значениями параметров; 5 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор в режиме поиска минимума

Fig. 3. The project for implementation of the first stage of the regulator optimization:

1 — the setpoint former; 2 — the subtraction element; 3 — the tunable regulator model; 4 — the model of the object with middle values of the parameters; 5 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer in the minimum search mode

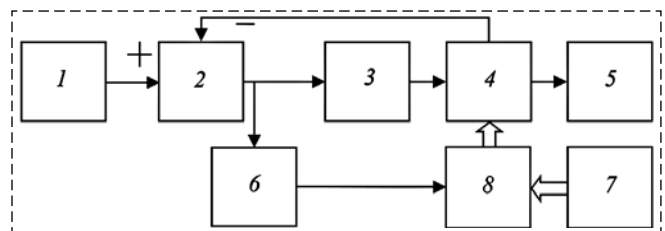


Рис. 4. Проект для реализации второго этапа оптимизации регулятора (отыскание худшей модели объекта):

1 — формирователь задания; 2 — вычитающий элемент; 3 — найденная на первом этапе модель регулятора; 4 — перестраиваемая модель объекта; 5 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор в режиме поиска максимума

Fig. 4. The project for implementation of the second stage of the regulator optimization (the search of the worst model of the object):

1 — the setpoint former; 2 — the subtraction element; 3 — the regulator model found at the first stage; 4 — the tunable object model; 5 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer in the maximum search mode

Проект используется для численного моделирования и оптимизации. Он содержит формирователь задания 1, вычитающий элемент 2, модель регулятора 3, модель объекта 4, осциллограф 5, оценщик стоимостной функции 6, формирователь стартовых значений 7 и оптимизатор 8. На первом этапе по структуре рис. 3 отыскивается настройка регулятора для объекта, в котором все параметры занимают средние значения из области своих допустимых значений. На втором этапе с этим регулятором отыскивается такой набор параметров объекта, при котором исходная стоимостная функция принимает максимальное значение.

Если программное средство для решения задачи позволяет осуществлять оптимизацию только путем отыскания минимума стоимостной функции, как это сделано в программе *VisSim*, то на втором этапе следует использовать модифицированную функцию, которая вычисляется путем вычитания исходной стоимостной функции из большого положительного числа, заведомо большего любого значения этой стоимостной функции.

Численный пример решения поставленной задачи

Рассмотрим модель объекта в следующем виде:

$$u(s) = e^{-0,05s} \frac{1 + 2s + s^2}{a + bs + cs^2 + s^3}.$$

Здесь параметры модели объекта изменяются в следующем интервале:

$$a = 0,1...0,3; b = 0,2...0,8; c = 0,1...0,3.$$

Перепишем уравнение второй части передаточной функции (без элемента запаздывания) в следующем виде:

$$(s^2 + 2s + 1)u(s) = (s^3 + cs^2 + bs + a)x(s).$$

Далее раскроем скобки и получим:

$$s^3x + cs^2x + bsx + ax = s^2u + 2su + u.$$

Простыми преобразованиями получим соотношение для моделирования с использованием интеграторов:

$$x = \frac{1}{s} \left\{ u - cx + \frac{1}{s} \left[2u - bx + \frac{1}{s} (u - ax) \right] \right\}.$$

Моделирование этой части модели объекта по данному соотношению позволяет наиболее просто изменять ее коэффициенты.

Для оптимизации предлагается использовать следующую целевую функцию:

$$F_1(T) = \int_0^T \{f_{11}(t) + k_w f_{12}(t)\} dt,$$

$$f_{11}(t) = |e(t)|t; f_{12}(t) = \max \left\{ 0, e(t) \frac{de(t)}{dt} \right\}.$$

Здесь T — время моделирования процесса; $f_{11}(t)$ — основное ядро стоимостной функции; $f_{12}(t)$ — показатель роста ошибки, который принимает нулевое значение, если произведение ошибки на ее производную отрицательно, и равно этому произведению, если оно положительно; k_w — весовой коэффициент; $e(t)$ — ошибка управления.

На рис. 5 показан проект для первого этапа решения в программе *VisSim*. Найденные значения коэффициентов ПИД регулятора показаны в соответствующих блоках дисплея, они равны: $K_p = 7,49$, $K_I = 1,86$, $K_D = 0,607$. На рис. 6

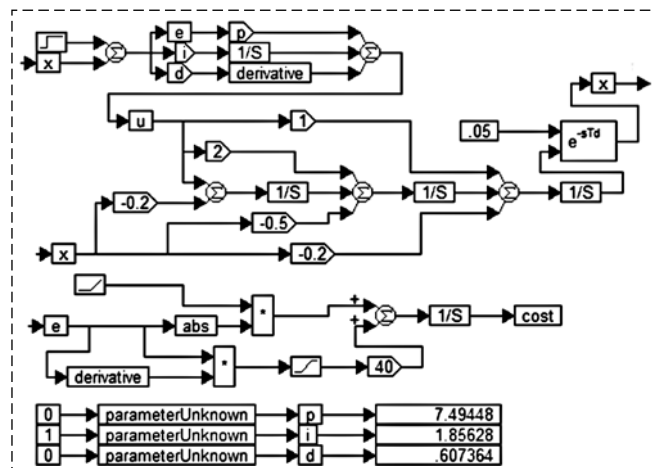


Рис. 5. Проект для первого этапа решения в программе *VisSim*
Fig. 5. The project for the first stage of the solution in *VisSim* software

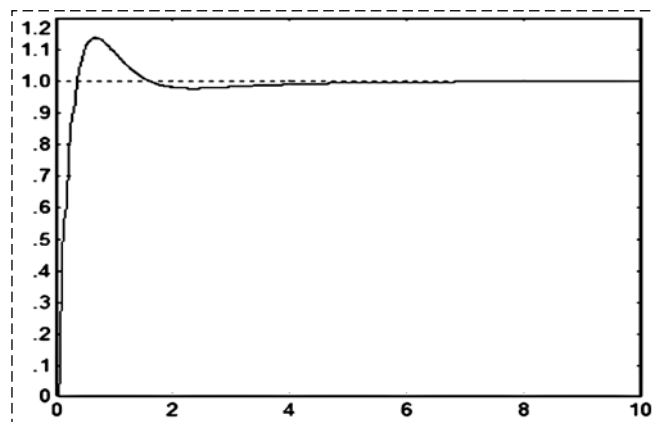


Рис. 6. Переходный процесс в системе после оптимизации ПИД регулятора
Fig. 6. The transient process in the system after optimization of the PID regulator

показан переходный процесс в системе после оптимизации ПИД регулятора.

На рис. 7 показан проект для отыскания наихудшего сочетания коэффициентов модели объекта.

Здесь потребовалось следующее изменение стоимостной функции. Во-первых, в нее введены слагаемые, которые ограничивают область поиска заданной границей допустимых изменений для каждого интервала. Во-вторых,

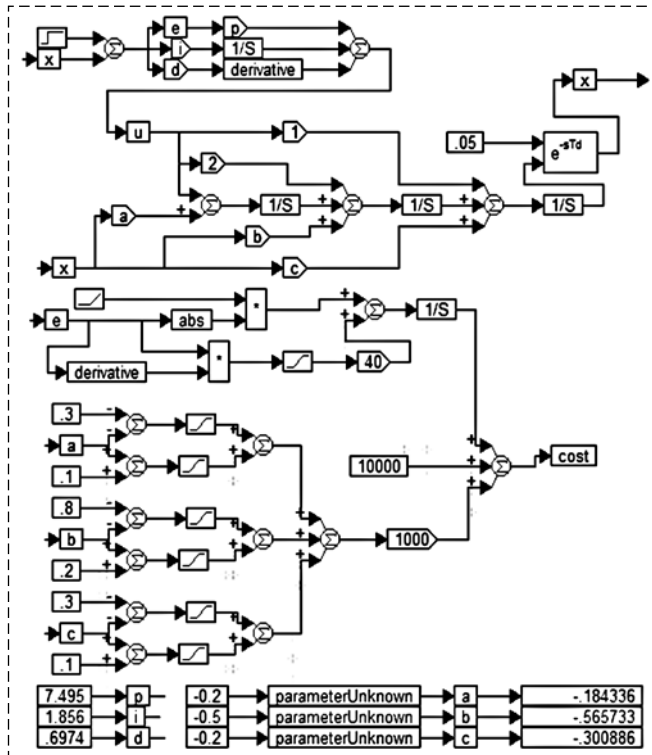


Рис. 7. Проект для отыскания наихудшего сочетания коэффициентов модели объекта

Fig. 7. The project for search of the worst combination of the object model coefficients

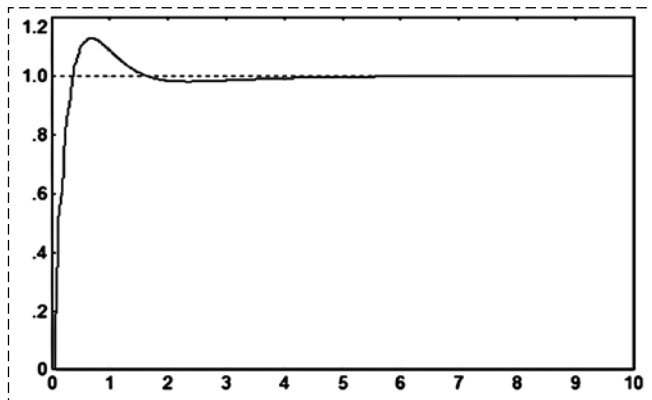


Рис. 8. Переходный процесс для сочетания параметров объекта в системе с регулятором, коэффициенты которого найдены на первом этапе

Fig. 8. The transient process for the object parameters combination in the system with the regulator coefficients found at the first stage

исходная стоимостная функция взята с обратным знаком. В-третьих, для того чтобы стоимостная функция всегда оставалась положительной, к ней добавлена большая положительная константа.

Найденные коэффициенты таковы: $a = 0,184336$; $b = 0,565733$; $c = 0,300$. На рис. 8 показан переходный процесс для этого сочетания параметров объекта в системе с регулятором, коэффициенты которого найдены на первом этапе.

На рис. 9 показан проект для отыскания коэффициентов регулятора для случая наихудшей модели объекта. Результат в виде окончательных значений коэффициентов регулятора показан в дисплеях значений, а именно: $K_P = 7,69$; $K_I = 1,65$; $K_D = 0,59$. На рис. 10 показано се-

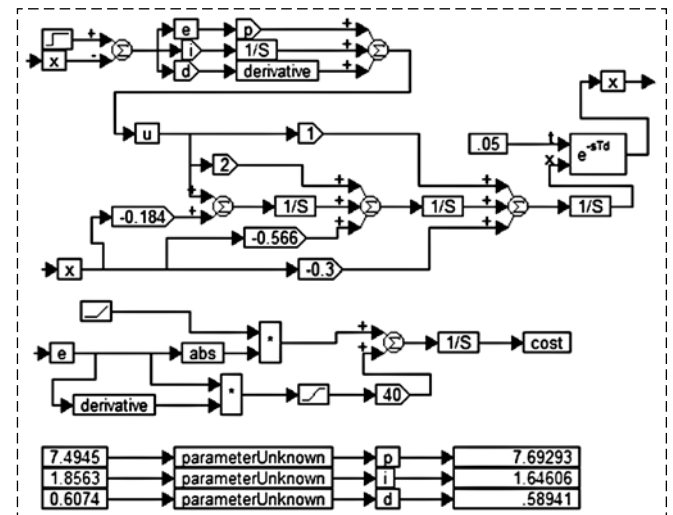


Рис. 9. Проект поиска коэффициентов регулятора для наихудшей модели объекта

Fig. 9. The project for search of regulator coefficients for the worst model of the object

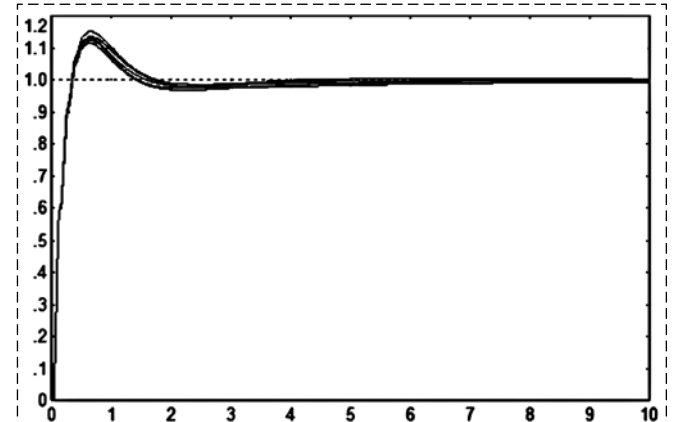


Рис. 10. Семейство переходных процессов при различных значениях параметров объекта, включая найденное наихудшее значение и крайние значения

Fig. 10. The family of transient processes at the different values of the object parameters including the worst one found and the bound values

мейство переходных процессов при различных значениях параметров объекта, включая найденное наихудшее значение и крайние значения параметров. Видно, что разница в графиках несущественна.

Обсуждение и выводы

График, который соответствует рассчитанному наихудшему сочетанию параметров объекта, возможно, не является самым худшим по каким-либо отдельным критериям, например, перерегулирование в этом случае не самое большое. Можно было бы с новым рассчитанным регулятором повторить процедуру. Однако полученные результаты можно признать вполне удовлетворительными, регулятор действительно получился робастным, поскольку графики переходных процессов (см. рис. 10) отличаются несущественно.

В данной статье впервые предложен метод проектирования робастного регулятора путем отыскания наихудшей возможной модели объекта методом численной оптимизации с последующим отысканием наилучшего регулятора для этого случая также методом численной оптимизации. В первом случае оптимизация осуществляется по измененному критерию оптимальности, который формируется в виде разности между фиксированной большой величиной и релевантной целевой функции. Также в целевую функцию вводятся слагаемые, резко возрастающие, если параметр модели объекта выходит за пределы своих допустимых границ, что позволяет задачу глобального поиска трансформировать в задачу локального поиска. Два последовательных этапа дают в итоге робастный регулятор, если для поставленной задачи таковой существует. Методом численной оптимизации продемонстрирована на численном примере работоспособность и достаточная эффективность предложенного метода. Дальнейшие исследования позволят определить область применения этого метода и его эффективность для наиболее сложных задач.

Список литературы

1. Veselý V. A new method to robust controller design // Proc. of 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC). Tatranska Lomnica. 2016. P. 779–781.
2. Oliveira V. A., Tognetti E. S., Siqueira D. Robust controllers enhanced with design and implementation processes // Proc. of IEEE Transactions on Education. 2011. Vol. 49, N. 3. P. 370–382.
3. Vitecek A., Viteckova M. Robust control of mechanical systems // Proc. of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC). Szilvasvarad. 2015. P. 575–579.

4. Chesi G. Convex Synthesis of Robust Controllers for Linear Systems with Polytopic Time-Varying Uncertainty // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62, N. 1. P. 337–349.
5. Astudillo A., Bacca B., Rosero E. Optimal and robust controllers design for a smartphone-based quadrotor // Proc. of 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). Cartagena. 2017. P. 1–6.
6. Vardhana P. H., Kumar B. K., Kumar M. A robust controller for DSTATCOM // In: 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Lisbon, 2009. P. 546–551.
7. Molins C., Garcia-Sanz M. Automatic loop shaping of QFT robust controllers // Proc. of the IEEE 2009 National Aerospace & Electronics Conference (NAECON), Dayton, OH. 2009. P. 103–110.
8. Ny J. Le, Pappas G. J. Sequential composition of robust controller specifications // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, MN. 2012. P. 5190–5195.
9. Ebihara Y., Peaucelle D., Arzelier D., Hagivara T. Robust H2 performance Analysis of Uncertain LTI Systems via Polynomially Parameter Dependent Lyapunov functions // Proc. of IFAC Symp. ROCOND'06. 2006.
10. Oliveira R. C. L. F., Peres P. L. D. LMI Conditions for robust stability analysis based on Polynomial Parameter Dependent Lyapunov functions // Systems and Control Letters. 2006. Vol. 55. P. 52–61.
11. Veselý V., Rosinová D. Robust PID-PSD Controller design: BMI approach // Asian Journal of Control. 2012. Vol. 15. P. 469–478.
12. Chesi G. LMI techniques for optimization over polynomials in control: A survey // IEEE Trans. Autom. Control. 2010. Vol. 55, N. 11. P. 2500–2510.
13. Chesi G. Sufficient and necessary LMI conditions for robust stability of rationally time-varying uncertain systems // IEEE Trans. Autom. Control. 2013. Vol. 58, N. 6. P. 1546–1551.
14. Geromel J. C., Colaneri P. Robust stability of time varying polytopic systems // Syst. Control Lett. 2006. Vol. 55, N. 1. P. 81–85.
15. Scheiderer C., Putinar M., Sullivant S. Positivity and sums of squares: A guide to some recent results // in Emerging Applications of Algebraic Geometry. New York, NY USA: Springer–Verlag, 2009. Vol. 149. P. 271–324.
16. Cedro L. Identification of an electrically driven manipulator using the differential filters – input error method // Acta Mechanica et Automatica. 2012. Vol. 6, N. 2. P. 23–27.
17. Lewis F. L., Dawson D. M., Abdallah Ch. T. Robot Manipulator Control in Theory and Practice. New York: Marcel Dekker, 2006.
18. Liu H., Wang X. Quaternion-based robust attitude control for quadrotors // 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 920–925.
19. Lopez R., Gonzalez-Hernandez I., Salazar S., Rodriguez A. E., Ordaz J. J., Osorio. Disturbance rejection for a Quadrotor aircraft through a robust control // In Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 409–415.
20. Jung J., Jung Y., You D., Shim D. H. A flight control system design for highly unstable unmanned combat aerial vehicles // In Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 1117–1125.
21. Kohno S., Uchiyama K. Design of robust controller of fixed-wing UAV for transition flight // In Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 1111–1116.
22. Shang B., Liu J., Zhao T., Chen Y. Fractional order robust visual servoing control of a quadrotor UAV with larger sampling period // In Proc. of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2016. Vol. 1, N. 209. P. 1228–1234.
23. Salazar S., Gonzalez-Hernandez I., Lopez R., Lozano R. Simulation and robust trajectory tracking for a Quadrotor UAV // In Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 1167–1174.
24. Pearce C., Guckenberger M., Holden B., Leach A., Hughes R., Xie C., Hassett M., Adderley A., Barnes L. E., Sherriff M.,

Lewin G. C. Designing a spatially aware automated quadcopter using an Android control system // In Proc. of 2014 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS). 2014. P. 23–28.

25. Bjälemark A., Bergkvist H. Quadcopter control using Android based sensing // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2014. P. 15–21.

26. Loianno G., Cross G., Qu C., Mulgaonkar Y., Hesch J. A., Kumar V. Flying Smartphones: Automated flight enabled by consumer electronics // IEEE Robotics Automation Magazine. 2015. Vol. 22. P. 24–32.

27. Aldrovandi L., Hayajneh M., Melega M., Furci M., Naldi R., Marconi L. A smartphone based quadrotor: Attitude and position estimation // In Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 1251–1259.

28. Bryant P., Gradwell G., Claveau D. Autonomous UAS controlled by onboard smartphone // In Proc. of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 451–454.

29. Заворин А. Н., Новицкий С. П., Жмуд В. А., Ядрышников О. Д., Поллер Б. В. Синтез робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 2(47). С. 196–200.

30. Заворин А. Н., Полищук А. В., Ядрышников О. Д., Жмуд В. А. Проектирование робастных регуляторов методом численной оптимизации их параметров для ансамбля объектов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 1(67). С. 15–24.

31. Жмуд В. А., Заворин А. Н., Полищук А. В., Ядрышников О. Д. Проектирование робастных регуляторов для управления тепловыми процессами паронагревателя мето-

дом численной оптимизации их параметров для ансамбля моделей систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 2(104). С. 47–55.

32. Жмуд В. А., Семибаламут В. М., Димитров Л. В. Робастное проектирование ресурсосберегающего двухканального регулятора для объекта с одним выходом // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1(11). С. 22–28.

33. Zemtsov N. S., Hlava J., Frantsuzova G. A. Using the robust PID controller to manage the population of thermostatically controlled loads // Proc. of Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM): proc., Chelyabinsk: IEEE, 2017. 4 p.

34. Zhmud V., Prokhorenko E., Liapidevskiy A. B. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. // Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010. Phuket, 2010. P. 27–32.

35. Zhmud V. A., Zavorin A. N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati // Italian Science Review. 2014. N. 4(13). P. 686–689.

36. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators // Proceedings — 2012 7th International Forum on Technology (IFOST 2012), proc., Tomsk, 18–21 Sept. 2012. IEEE, 2012. Art. 6357804 (5 p.).

37. Zhmud V. A., Reva I. L., Dimitrov L. V. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803. Art. 012185 (6 p.). (International conference on information technologies in business and industry, Tomsk, 21–26 Sept. 2016).

Synthesis of Robust PID Controllers by Double Optimization Method

V. A. Zhmud, oao_nips@bk.ru, A. S. Vostrikov, a.s.vostrikov@gmail.com, A. Yu. Ivoilov, iau13hv@mail.ru, G. V. Sablina, sablina@corp.nstu.ru,

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Corresponding author: Ivoilov Andrei Yu., PhD-student of Department of Automation, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, e-mail: iau13hv@mail.ru

Accepted on September 26, 2019

Abstract

The design of adaptive controllers allows to solve the problem of control of the object with non-stationary parameters. However, if the parameters of the object do not change too much or if only a certain interval of their change is known, it may turn out that an adaptive controller is not required, since the problem can be solved with the help of a robust controller. The robust controller allows to provide an acceptable quality of control even if the parameters of the mathematical model of the object change in some predetermined interval. A method of designing such controllers is known as the method of numerical optimization of the controllers used in the ensemble of systems in which the models of objects are different and the models of controllers are identical. The ensemble uses object models with extreme parameter values. The disadvantages of this method are too many systems that need to be modeled and optimized at the same time if there are several parameters to be changed. In addition, the worst combination of model parameters may not be boundary, but middle, in this case this method is not applicable. This article offers and analyzes an alternative method of designing a robust controller on a numerical example. The essence of this method is the numerical optimization of the regulator for the model with the worst combination of the values of all modifiable parameters. The search for the worst combination of parameters is also carried out using the method of numerical optimization. In this case, a combination of model parameters is found in which the best relation of regulator coefficients gives the worst result of the system. The problem is solved in several optimization cycles with alternating cost functions. The utility of the method is illustrated numerically by an example of a third order dynamic object with a series linked delay element.

Keywords: numerical optimization, regulation, robust system, simulation, mathematical model, object, PID controller

For citation:

Zhmud V. A., Vostrikov A. S., Ivoilov A. Yu., Sablina G. V. Synthesis of Robust PID Controllers by Double Optimization Method,

Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 67–73.

DOI: 10.17587/mau.21.67-73

References

1. Veselý V. A new method to robust controller design, *Proc. of 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Tatranska Lomnica, 2016, pp. 779–781.
2. Oliveira V. A., Tognetti E. S., Siqueira D. Robust controllers enhanced with design and implementation processes, *Proc. of IEEE Transactions on Education*, 2011, vol. 49, no. 3, pp. 370–382.
3. Vitecek A., Viteckova M. Robust control of mechanical systems, *Proc. of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Szilvasvarad, 2015, pp. 575–579.
4. Chesi G. Convex Synthesis of Robust Controllers for Linear Systems with Polytopic Time-Varying Uncertainty, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 337–349.
5. Astudillo A., Bacca B., Rosero E. Optimal and robust controllers design for a smartphone-based quadrotor, *Proc. of 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, Cartagena, 2017, pp. 1–6.
6. Vardhana P. H., Kumar B. K., Kumar M. A robust controller for DSTATCOM, In: *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Lisbon, 2009, pp. 546–551.
7. Molins C., Garcia-Sanz M. Automatic loop shaping of QFT robust controllers, *Proc. of the IEEE 2009 National Aerospace & Electronics Conference (NAECON)*, Dayton, OH, 2009, pp. 103–110.
8. Ny J. Le, Pappas G. J. Sequential composition of robust controller specifications, *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, 2012, pp. 5190–5195.
9. Ebihara Y., Peaucelle D., Arzelier D., Hagivara T. Robust H2 performance Analysis of Uncertain LTI Systems via Polynomially Parameter Dependent Lyapunov functions, *Proc. of IFAC Symp. RO-COND'06*, 2006.
10. Oliveira R. C. L. F., Peres P. L. D. LMI Conditions for robust stability analysis based on Polynomial Parameter Dependent Lyapunov functions, *Systems and Control Letters*, 2006, vol. 55, pp. 52–61.
11. Veselý V., Rosinová D. Robust PID-PSD Controller design: BMI approach, *Asian Journal of Control*, 2012, vol. 15, pp. 469–478.
12. Chesi G. LMI techniques for optimization over polynomials in control: A survey, *IEEE Trans. Autom. Control*, 2010, vol. 55, no. 11, pp. 2500–2510.
13. Chesi G. Sufficient and necessary LMI conditions for robust stability of rationally time-varying uncertain systems, *IEEE Trans. Autom. Control*, 2013, vol. 58, no. 6, pp. 1546–1551.
14. Geromel J. C., Colaneri P. Robust stability of time varying polytopic systems, *Syst. Control Lett.*, 2006, vol. 55, no. 1, pp. 81–85.
15. Scheiderer C., Putinar M., Sullivant S. Positivity and sums of squares: A guide to some recent results // in *Emerging Applications of Algebraic Geometry* New York NY USA: Springer-Verlag, 2009, vol. 149, pp. 271–324.
16. Cedro L. Identification of an electrically driven manipulator using the differential filters — input error method // *Acta Mechanica et Automatica*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 23–27.
17. Lewis F. L., Dawson D. M., Abdallah Ch. T. *Robot Manipulator Control in Theory and Practice*, New York, Marcel Dekker, 2006.
18. Liu H., Wang X. Quaternion-based robust attitude control for quadrotors, *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 920–925.
19. Lopez R., Gonzalez-Hernandez I., Salazar S., Rodriguez A. E., Ordaz J. J., Osorio. Disturbance rejection for a Quadrotor aircraft through a robust control, In *Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 409–415.
20. Jung J., Jung Y., You D., Shim D. H. A flight control system design for highly unstable unmanned combat aerial vehicles, In *Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 1117–1125.
21. Kohno S., Uchiyama K. Design of robust controller of fixed-wing UAV for transition flight, In *Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 1111–1116.
22. Shang B., Liu J., Zhao T., Chen Y. Fractional order robust visual serving control of a quadrotor UAV with larger sampling period, In *Proc. of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2016, vol. 1, no. 209, pp. 1228–1234.
23. Salazar S., Gonzalez-Hernandez I., Lopez R., Lozano R. Simulation and robust trajectory tracking for a Quadrotor UAV, In *Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 1167–1174.
24. Pearce C., Guckenberger M., Holden B., Leach A., Hughes R., Xie C., Hassett M., Adderley A., Barnes L. E., Sherriff M., Lewin G. C. Designing a spatially aware automated quadcopter using an Android control system, In *Proc. of 2014 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, 2014, pp. 23–28.
25. Bjälemark A., Bergkvist H. Quadcopter control using Android based sensing, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2014, pp. 15–21.
26. Loiano G., Cross G., Qu C., Mulgaonkar Hesch J. A., Kumar V. Flying Smartphones: Automated flight enabled by consumer electronics, *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2015, vol. 22, pp. 24–32.
27. Aldrovandi L., Hayajneh M., Melega M., Furci M., Naldi R., Marconi L. A smartphone based quadrotor: Attitude and position estimation, In *Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 1251–1259.
28. Bryant P., Gradwell G., Claveau D. Autonomous UAS controlled by onboard smartphone, In *Proc. of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 451–454.
29. Zavorin A. N., Novickij S. P., Zhmud V. A., Yadrishnikov O. D., Poller B. V. The synthesis of the robust controller by double iterative parallel numerical optimization method, *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 2, vol. 47, pp. 196–200 (in Russian).
30. Zavorin A. N., Polishchuk A. V., Yadrishnikov O. D., Zhmud V. A. The development of robust regulators by a method of numerical optimization of their parameters for an ensemble of objects, *Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1, vol. 67, pp. 15–24 (in Russian).
31. Zhmud V. A., Zavorin A. N., Polishchuk A. V., Yadrishnikov O. D. The development of robust regulators for control of thermal processes of a steam heater by a method of numerical optimization of their parameters for an ensemble of system models, *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij*, 2013, no. 2, vol. 104, pp. 47–55 (in Russian).
32. Zhmud V. A., Semibalmut V. M., Dimitrov L. V. The robust development of the resource saving dual channel regulator for an object with a single input, *Avtomatika i Programmnyaya Inzheneriya*, 2015, no. 1, vol. 11, pp. 22–28 (in Russian).
33. Zemtsov N. S., Hlava J., Frantsuzova G. A. Using the robust PID controller to manage the population of thermostatically controlled loads, *Proc. of Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM): proc.*, Chelyabinsk, IEEE, 2017, 4 p.
34. Zhmud V., Prokhorenko E., Liapidevskiy A. B. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6, *Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010*, Phuket, 2010, pp. 27–32.
35. Zhmud V. A., Zavorin A. N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati, *Italian Science Review*, 2014, no. 4 (13), pp. 686–689.
36. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators, *Proceedings — 2012 7th International Forum on Technology (IFOST 2012)*, proc., Tomsk, 18–21 Sept. 2012, IEEE, 2012, Art. 6357804 (5 p.).
37. Zhmud V. A., Reva I. L., Dimitrov L. V. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, Art. 012185 (6 p.) (International conference on information technologies in business and industry, Tomsk, 21–26 Sept. 2016).

О. В. Карсаев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., karsaev@ips-logistic.com,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург

Модификация CGR-алгоритма маршрутизации данных в коммуникационной сети группировки спутников*

Сети связи в космических системах, предполагающих использование группировок спутников, являются DTN-сетями (Delay and Disruption Tolerant Networks). Установление каналов связей в космических сетях связи обладает определенной спецификой: каналы связи могут планироваться. В связи с этим в качестве наиболее перспективного решения задачи маршрутизации данных рассматривается CGR-подход (Contact Graph Routing). В основе этого подхода с учетом указанной специфики лежит расчет плана контактов. На основе этого плана в узлах сети рассчитываются графы контактов, которые используются для поиска кратчайших маршрутов передачи данных.

В данной статье в качестве модификации данного подхода предлагаются два взаимосвязанных решения: поиск маршрутов на основе плана контактов, т. е. без расчета и использования графа контактов, и адаптивный метод поиска необходимой для маршрутизации совокупности кратчайших маршрутов. Суть первого решения состоит в следующем. В стандартном варианте CGR-подхода вершины графа соответствуют планируемым контактам между узлами сети, а ребра — процессам хранения данных в узлах сети. В отличие от этого в предлагаемом варианте вершины графа соответствуют узлам сети, а ребра графа и вес ребер графа определяются динамически, в процессе поиска кратчайших маршрутов. В основе второго решения вводится понятие фронта планирования, под которым понимается список контактов. Искомые маршруты разбиваются на определенное число пулов. В каждом пуле объединяются маршруты, в которых используется определенный контакт из фронта планирования. Фронт планирования обновляется в двух случаях. В случае изменения топологии сети происходит замещение использованных или не установленных контактов последующими контактами с теми же самыми узлами сети, ближайшими по времени. В случае роста трафика сообщений выполняется определенное расширение фронта планирования и используются дополнительные пулы маршрутов. В заключении статьи приводится описание и обоснование ожидаемых преимуществ предложенного подхода.

Ключевые слова: группировка спутников, DTN-сеть, CGR-маршрутизация

Введение

Основой системы планирования и управления группировкой спутников является информационное взаимодействие, разработка которого предопределяется возможностями сети связи. Физической основой сети являются каналы связи, которые могут устанавливаться между спутниками и между спутниками и наземными станциями в интервалах времени, когда они находятся в зоне прямой видимости друг друга. Эти интервалы времени предопределяются следующими основными факторами:

- орбитальное построение и число спутников группировки;
- географическое положение и число наземных станций;
- технические возможности и ограничения системы связи спутников, в частности — максимальная дальность передачи радиосигналов, число каналов связи, которое одновременно может обеспечиваться спутником.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00840).

Основной задачей при организации сети связи является маршрутизация передачи данных. В случае космических сетей связи данная задача рассматривается с учетом двух основных факторов: мобильности узлов сети (спутников) и связанности или несвязанности сети. Сеть является связанной, если в любой момент времени между любой парой узлов существует маршрут передачи сообщений.

В случае космических систем, как правило, полагается, что сеть является несвязанной. Связанные сети рассматриваются только в двух частных случаях. В первом случае рассматриваются группировки, состоящие из небольшого числа спутников, находящихся на незначительном расстоянии друг от друга. Такие конфигурации, как правило, рассматриваются в экспериментальных миссиях. В частности, в одном из первых проектов по отработке информационного взаимодействия — Edison Demonstration of Small Sat Network (EDSN) [1] — рассматривалась группировка из восьми спутников, находящихся на расстоянии друг от друга менее 100 км. Во втором случае рассматриваются группировки, состоящие из значи-

тельного числа спутников. При этом их число определяется исходя из требования, что сеть должна быть связанной. Такие группировки, в частности, рассматриваются в таких футуристических проектах, как OneWeb [2] и Сфера [3], предполагающих использование 700 и 640 спутников соответственно.

Связанные сети, в которых узлы являются мобильными, обобщенно называются MANET-сетями (от англ. Mobil Ad-hock Network). Маршрутизация в сетях такого типа сводится к распространению в сети данных, описывающих происходящие изменения топологии сети. На основании этих данных в узлах сети пересчитываются таблицы маршрутизации, и после этого продолжается передача сообщений. После пересчета таблиц маршрутизации время передачи сообщений по найденным маршрутам зависит от плотности трафика и пропускной способности каналов связи и составляет, как правило, доли секунды. Однако время распространения служебных данных об изменениях топологии сети может быть весьма существенным. Поэтому в зависимости от конкретных свойств сети (плотности сети, скорости перемещения узлов и др.) рассматриваются различные стратегии и протоколы маршрутизации [4–7].

В случае несвязанных сетей методы маршрутизации разрабатываются на основе иных подходов, учитывающих разрывы сети и временные задержки передачи данных. Такие сети называются DTN-сетями (от англ. Delay-and-disruption Tolerant Networks). Протоколы маршрутизации в таких сетях по аналогии с протоколами маршрутизации в MANET-сетях разрабатываются с учетом конкретных специфических особенностей предметных областей. Обзор протоколов маршрутизации в DTN-сетях можно найти в работе [8].

В DTN-сетях различаются три класса сетей, в которых связь между узлами сети является случайной, вероятностной или планируемой, и соответственно рассматриваются три класса протоколов маршрутизации. Сети связи космических систем относятся к последнему классу, в котором связь между узлами может планироваться. В этом классе DTN-сетей наиболее эффективным и активно развиваемым является CGR-подход (от англ. Contact Graph Routing). Данный подход рассматривается в интеграции с DTN-технологией передачи данных, которая разрабатывается в NASA в рамках программы Advanced Exploration Systems с 2002 г. [9].

В основу этой технологии положен следующий базовый принцип. Если узел не смог передать пакет данных, то этот пакет не удаляется, а сохраняется в узле и передается повторно в рамках последующих контактов. Таким образом, информация всегда доходит до получателя. Для более эффективного использования пропускной способности каналов связи выполняется фрагментация передаваемых данных на несколько пакетов ограниченного размера. Более детальное описание DTN-технологии можно найти в работах [10, 11]. Следует отметить, что Международный консультативный комитет по космическим системам передачи данных (CCSDS) предлагает всем космическим агентствам мира устанавливать на свои новые автоматические и пилотируемые аппараты оборудование, работающее по DTN-технологии. Такое оборудование, в частности, уже используется на Международной космической станции.

В упомянутых выше частных конфигурациях космических систем, когда сеть является связанной, использование CGR-подхода также представляется более предпочтительным по сравнению с методами маршрутизации в MANET-сетях вследствие следующих причин. Для обеспечения межспутниковой связи представляется более целесообразным использование направленных каналов связи из-за большей дальности передачи радиосигналов. При этом установление направленных каналов связи требует предварительного планирования и передачу спутникам временных и пространственных параметров для ориентации антенн. Это полностью согласуется с тем, что основой CGR-подхода является расчет и передача спутникам плана контактов. Кроме того, план контактов предполагает включение приемных устройств спутников в определенные интервалы времени. В противном случае они должны постоянно находиться во включенном состоянии, что влечет повышенный расход энергии. Можно заметить, что в ранее упомянутом EDSN-проекте [1] несмотря на связанность сети предполагается установление каналов связи по заранее разработанному плану.

Исходная концептуальная модель CGR-подхода была опубликована в работе [12] в 2011 г. С тех пор этот подход является объектом активного развития, краткий обзор современного состояния CGR-подхода представлен в п. 1 данной статьи. В п. 2 статьи приводится описание новых методов поиска маршрутов, предла-

гаемых автором, и спецификации CGR-подхода в целом с учетом использования этих методов.

1. Современное состояние CGR-подхода

В основу концептуальной модели CGR-подхода положена специфика полета спутников, которая позволяет достаточно точно рассчитывать интервалы времени, когда между спутниками и между спутниками и наземными пунктами появляется возможность передачи информации. На основании этого на Земле рассчитывается план установления каналов связи, который в модели называется планом контактов. Определение контактов в плане включает описание пар узлов, между которыми устанавливаются контакты, запланированные интервалы времени контактов и скорость передачи данных. План контактов рассчитывается централизованно и далее передается всем узлам сети, спутникам и наземным станциям. На основании плана контактов в узлах сети формируются графы контактов, которые используются для поиска маршрутов передачи данных в зависимости от текущего состояния спутников и трафика сообщений.

Одной из первых работ по развитию CGR-подхода была работа [13]. В ней для определения кратчайшего пути была введена метрика самого раннего времени доставки данных в узел назначения и описан способ решения задачи маршрутизации с помощью стандартного алгоритма Дейкстры [14]. Передача данных может начинаться сразу же после установления контактов, либо в текущий момент времени, если контакт уже установлен. При этом расчет значения метрики не является точным. В связи с этим в работе [15] были предложены два взаимосвязанных решения, обеспечивающих более высокую точность планирования: определение оценки самого раннего времени отправки сообщений и управление очередями сообщений в случае превышения пропускной способности контактов с учетом их (сообщений) приоритетов.

Основное время вычислений в рамках CGR-подхода тратится на формирование графов контактов и поиск маршрутов передачи сообщений. Для минимизации этих вычислений в работе [16] было предложено передавать в заголовках пакетов данных маршруты передачи, рассчитанные в исходных узлах маршрута. В этом случае необходимость в маршрутизации

в промежуточных узлах возникает только в том случае, если дальнейшая передача данных по исходному маршруту становится невозможной.

Одной из основных проблем маршрутизации в DTN-сетях является возникновение застоя данных в узлах сети в случае чрезмерного трафика из-за ограничения памяти узлов и пропускных способностей контактов. Эта проблема является объектом исследований во многих работах. В частности, в работе [17] предлагается использовать имеющиеся в узлах структурные данные о возможностях сети в целом, а именно — пропускные способности контактов и ограничения памяти в узлах сети. Использование этих данных позволяет выбирать маршруты с учетом прогнозирования возникновения застоя в промежуточных узлах маршрутов. Однако это решение обладает ограниченными возможностями, так как не позволяет выявлять застои, возникающие в результате входных трафиков из других узлов сети. Для частичного преодоления этой проблемы в работе [18] предлагается подход, в котором при установлении контактов узлы обмениваются данными о наличии свободной памяти. Таким образом, в этом случае может выявляться застой, возникающий в результате входных трафиков из разных исходных узлов, но только в узлах сети, с которыми имеются установленные контакты. Обзор других разрабатываемых подходов к решению проблемы застоя в узлах сети можно найти в работе [19].

Основой CGR-подхода является расчет плана контактов. Содержательный анализ этой задачи рассматривается в работе [20]. Интервалы времени, когда пары узлов находятся в прямой видимости друг друга и в пределах дальности действия передающих устройств, рассчитываются на основе имитационного моделирования движения спутников по своим орбитам и являются исходными данными в этой задаче. На основе этих данных план контактов должен рассчитываться с учетом числа одновременных контактов, которое может устанавливать узел сети, а также с учетом дополнительных ограничений, когда связь между узлами спутников может быть невозможной даже в рамках исходных интервалов времени. В соответствии с этим расчет плана контактов является сложной комбинаторной задачей, для решения которой требуется разработка вспомогательной программной системы. Описание прототипа такой системы приводится в работе [21].

В сетях большой размерности, например, когда узлов более 100 и число контактов в плане может исчисляться миллионами, маршрутизация сообщений с помощью стандартного CGR-подхода может становиться неприемлемой по времени. В связи с этим в работе [22] предлагается компромиссный подход, который позволяет существенно снижать объем вычислений в узлах за счет некоторого увеличения времени доставки сообщений в узлы назначения. Увеличение времени в данном случае является следствием того, что определенное подмножество контактов просто не рассматривается и соответственно не используется при маршрутизации. В основе данного подхода лежит разбиение сети на несколько регионов и разбиение узлов на два типа — обычные региональные узлы и узлы-шлюзы, обеспечивающие передачу сообщений между регионами. При этом региональным узлам передаются планы контактов только с узлами своего региона. Узлы-шлюзы могут относиться к двум или более регионам и соответственно получают планы контактов этих регионов. При этом передача сообщений между узлами разных регионов рассчитывается без учета временных параметров контактов. В рассматриваемом подходе предполагается, что группировка спутников включает геостационарные спутники, наличие которых априори предопределяет основу построения маршрутов передачи данных.

В заключение обзора следует привести ссылку на работу [23], в которой приведена спецификация наиболее полного варианта реализации CGR-подхода, интегрирующая большинство предложенных решений по его развитию.

2. Модификация CGR-подхода

CGR-подход в целом сводится к решению двух задач: к поиску наилучших маршрутов и к планированию передачи имеющихся в узле сообщений на основе найденных маршрутов. Планирование предполагает распределение сообщений между ближайшими по времени контактами и определение очереди (порядка) передачи сообщений в рамках этих контактов в соответствии с приоритетами сообщений. При этом выбор контакта для передачи сообщения предопределяется выбором наилучшего возможного маршрута, так как этот контакт является первым элементом выбранного маршрута.

В результате решения первой задачи для каждого сообщения имеется несколько возможных маршрутов передачи. Наилучшим из них является маршрут, обеспечивающий наиболее раннее время доставки сообщения в узел назначения. Выбор наилучших маршрутов для всех сообщений возможен только при относительно низком трафике. В общем случае выбор наилучших маршрутов выполняется с учетом следующих ограничений.

Ограничение 1. Суммарные объемы данных, которые в соответствии с выбранными маршрутами передаются через соответствующие контакты и узлы сети, не должны превышать пропускной способности этих контактов и объема памяти в этих узлах сети. Это ограничение обобщает ограничения, которые рассматриваются в работах [15] и [17].

Ограничение 2. Сообщение не может передаваться тому узлу, из которого оно было получено. Это ограничение рассматривается в стандартной версии CGR-подхода для избегания заикливания передачи сообщений.

Как можно заметить из обзора, основным объектом исследований CGR-подхода была и остается задача планирования. В данной же статье основное внимание уделяется решению задачи поиска наилучших маршрутов. Предлагается два взаимосвязанных решения: поиск маршрутов на основе плана контактов и адаптивная схема поиска маршрутов.

Поиск маршрутов на основе плана контактов. В основе стандартного CGR-подхода рассматривается построение графа контактов, в котором вершины соответствуют контактам, а ребра — процессу хранения данных в узлах сети. Такое построение графа обеспечивает возможность поиска маршрутов с помощью алгоритма Дейкстры. Следует заметить, что именно это понятие — граф контактов — вынесено в название подхода в целом.

В отличие от этого в данной работе предлагается подход, в котором вершины графа соответствуют узлам сети, а ребра — контактам, которые выбираются динамически в процессе поиска маршрутов. В стандартном алгоритме Дейкстры длина маршрута до вершины графа является суммой весов ребер, из которых состоит этот маршрут. При этом вес ребра не может принимать отрицательных значений. В предлагаемом подходе вместо длины маршрута до вершины графа рассматривается та же метрика, что и в работе [13], — самое раннее

время доставки сообщения в узел сети (в вершину графа).

Однако в соответствии с предлагаемым подходом значения этой метрики определяются в результате выбора контактов из плана контактов следующим образом. Пусть V^1 и V^2 — два узла, между которыми во времени могут возникать (запланированы в плане контактов) контакты, R^1 , R^2 и L^1 , L^2 — соответственно известные маршруты и время доставки сообщения в узлы V^1 и V^2 из какого-то исходного узла V , $L^1 \leq L^2$. В общем случае маршрут R^2 может быть еще не известен, и в этом случае $L^2 = \infty$. Пусть C^{1-2} — самый ранний контакт между узлами V^1 и V^2 после времени L^1 . При этом могут быть две ситуации, этот контакт устанавливается после времени L^1 , т. е.

$$L^1 < \text{start}(C^{1-2}), \quad (1)$$

либо он уже установлен в это время, т. е.

$$\text{start}(C^{1-2}) \leq L^1 < \text{end}(C^{1-2}). \quad (2)$$

В зависимости от этого может быть получена новая оценка $\text{new } L^2$ доставки сообщения из узла V в узел V^2 :

$$\text{new } L^2 = \text{start}(C^{1-2})$$

в случае (1), и

$$\text{new } L^2 = L^1$$

в случае (2).

Следует заметить, что в любом случае выполняется условие $L^1 \leq \text{new } L^2$. Выполнение этого условия в предлагаемом подходе является аналогом базового условия алгоритма Дейкстры о том, что вес ребра графа не может принимать отрицательного значения.

Если при этом также выполняется условие

$$\text{new } L^2 < L^2,$$

тогда для доставки сообщения из узла V в узел V^2 может рассматриваться более короткий путь

$$\text{new } R^2 = \{R^1, C^{1-2}\},$$

состоящий из маршрута R^1 и контакта C^{1-2} .

В соответствии с приведенными пояснениями модификацию стандартного алгоритма Дейкстры, которая используется в предлагаемом подходе, можно представить следующим образом. В соответствии со схемой алгоритма рассматриваются два подмножества узлов сети:

$$\text{Set}^1 = \{<V(i), R(i), L(i)>\}, i = 1(1)k;$$

$$\text{Set}^2 = \{<V(j), [R(j), L(j)]>\}, j = k + 1(1), n,$$

где V — узел сети; R — найденный маршрут до этого узла; L — оценка самого раннего времени доставки сообщения в узел сети; n — число вершин в графе. Квадратные скобки во втором подмножестве указывают, что маршрут до вершины может быть еще не найден. При инициализации алгоритма $\text{Set}^1 = \emptyset$, а для узла V^* , из которого надо найти маршруты, $R = \emptyset$, L равно текущему моменту времени.

На каждой итерации из множества Set^2 выбирается узел сети с наименьшим значением L . На первой итерации им является узел V^* . Для этого узла выбираются узлы, с которыми у него возможны (запланированы в плане контактов) ближайшие во времени контакты, и в соответствии с рассмотренной выше схемой рассчитываются новые оценки самого раннего времени доставки сообщений в эти узлы, и сохраняются новые маршруты. После этого выбранный узел переносится из Set^2 в Set^1 . Поиск завершается, когда $\text{Set}^2 = \emptyset$.

Адаптивная схема поиска маршрутов.

В основе данной схемы для узла V , из которого надо найти маршруты, рассматривается понятие фронта планирования $\text{Front}(V, L)$. Значение параметра L равно текущему времени. Фронт планирования включает все ближайшие на момент времени L контакты этого узла V с другими узлами. Иными словами, во фронт планирования для каждого такого узла включается один контакт, который удовлетворяет условию (1) или условию (2).

На основе каждого контакта C из фронта планирования $\text{Front}(V, L)$ рассчитывается свой пул маршрутов $\text{Route_Pool}(C)$, т. е. маршрутов, в которых первым элементом является этот контакт C . Поиск маршрутов в каждом пуле выполняется рассмотренным выше методом на основе плана контактов. Таким образом, каждый пул $\text{Route_Pool}(C)$ для каждого узла сети содержит по одному наилучшему маршруту до каждого узла сети, начинающемуся контактом C .

Для передачи каждого сообщения оптимальным вариантом является выбор наилучшего маршрута, обеспечивающего наиболее раннее время доставки сообщения в узел назначения. Этот маршрут выбирается из числа всех пулов маршрутов. Однако вследствие ограничений сети могут возникать конфликты, разрешение которых сводится к выбору не наилучших маршрутов передачи для какого-то

Поиск наилучших маршрутов над планом контактов
Search for the best routes above the contact plan

№	Set1	B		C		D	
		L	R	L	R	L	R
1	A	1000	A-B	1100	A-C		
2	A, B	1000	A-B	1100	A-C	1100	A-B-D
3	A, B, C	1000	A-B	1100	A-C	1100	A-B-D
4	A, B, C, D	1000	A-B	1100	A-C	1100	A-B-D

подмножества сообщений. В этом случае выполняется расширение фронта планирования, т. е. включение дополнительных контактов, и расчет соответствующих пулов маршрутов, начинающихся через эти контакты. При этом совокупность дополнительных контактов определяется следующим образом. Пусть V_List — список сообщений, для которых требуется выбрать новые маршруты, а R_List — список маршрутов, которые рассматривались для передачи этих сообщений. Тогда расширение фронта планирования определяется списком контактов C_List , с которых начинались маршруты из списка R_List . При этом во фронт планирования включается по одному последующему контакту с теми же самыми узлами. Такое адаптивное расширение фронта контактов обеспечивает условие того, что в расширенной совокупности пулов будут содержаться маршруты, обеспечивающие наилучшие возможные маршруты до всех других узлов сети в данный момент времени.

Для наглядного пояснения предлагаемых решений рассмотрим пример (рис. 1), заимствованный из работы [23]. На рис. 1, а приведен план контактов, а на рис. 1, б — граф контактов, сформированный над этим планом, который используется для поиска маршрутов из узла A в узел D в стандартной версии CGR-подхода.

Сначала используем этот пример для наглядного пояснения поиска наилучших маршрутов над планом контактов (табл. 1). На первой итерации выбираются контакты узла A с узлом B (с началом в момент времени 1000) и с узлом C. На основании этих контактов определяются оценки самого раннего времени доставки сообщений в эти узлы (L) и соответствующие маршруты (R). В данных случаях самое раннее время соответствует времени на-

чала выбранных контактов A-B и A-C — 1000 и 1100, соответственно.

На второй итерации выбирается узел B, так как у него самое раннее время доставки сообщения (1000). Из оставшихся в Set^2 узлов C и D узел B имеет запланированные контакты только с D. Так как для узла B время доставки сообщения $L = 1000$, выбирается первый контакт B-D с началом в момент времени 1100, и это значение присваивается параметру L в узле D.

На третьей итерации в оставшихся в Set^2 узлах C и D время L одинаковое: $L = 1100$. В этом случае для продолжения поиска может выбираться любой из узлов. В данном случае выбран узел C. При этом самая ранняя доставка сообщения в узел D из узла C возможна в момент времени 1500, что хуже ранее найденного маршрута A-B-D с временем доставки 1100.

На четвертой итерации в Set^1 переносится вершина D, и на этом поиск заканчивается, так как множество Set^2 становится пустым.

Теперь этот же пример используется для пояснения адаптивной схемы поиска. В данном случае во фронт планирования узла A включаются контакты $\langle A-B, 1000 \rangle$ и $\langle A-C, 1100 \rangle$ и рассчитываются соответствующие им пулы маршрутов, $Route_Pool \langle A-B, 1000 \rangle$ и $Route_Pool \langle A-C, 1100 \rangle$. Наилучшим маршрутом до узла D в первом пуле является маршрут A-B-D с временем доставки $L = 1100$ (Route 1), во

втором — маршрут A-C-D с временем доставки $L = 1500$ (Route 3). В данном случае для всех сообщений в адрес D выбирается наилучший маршрут Route 1. Если при планировании выявляется, что какие-то из этих сообщений вследствие ограничений не могут передаваться по этому маршруту, то происходит расширение фронта планирования за счет контакта $\langle A-B, 1300 \rangle$ и расчет дополнительного пула маршрутов $Route_Pool \langle A-B, 1300 \rangle$. В этом пуле до вершины D находится

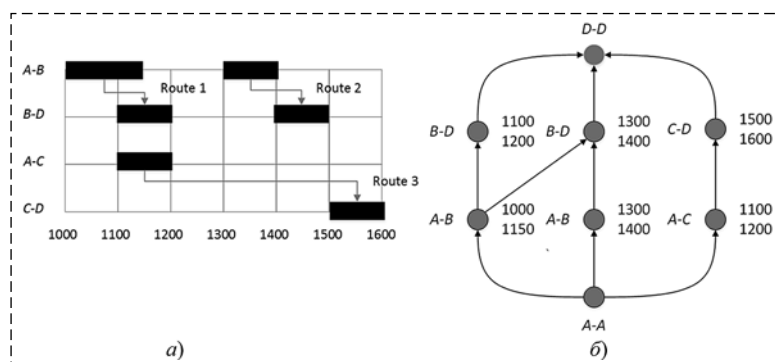


Рис. 1. План (а) и граф (б) контактов
Fig. 1. Plan (a) and graph (b) of contacts

маршрут $A-B-D$ с временем доставки $L = 1400$ (Route 2), который лучше маршрута Route 3 с временем доставки $L = 1500$.

3. Описание алгоритма

В данном разделе приводится описание спецификации алгоритма маршрутизации в целом.

Алгоритм маршрутизации запускается при возникновении соответствующих событий. В зависимости от типов событий алгоритму передаются соответствующие входные данные (табл. 2).

В левой части таблицы перечислены события, при возникновении которых происходит инициирование алгоритма, а в правой части — значения передаваемых входных данных в зависимости от типа события. В случае изменения топологии указывается контакт C , не установление, окончание или потеря которого повлекло изменение топологии сети. Установление контакта также является событием, изменяющим топологию сети. Однако в этом случае алгоритм маршрутизации не вызывается, так как на этот момент времени уже имеется план передачи сообщений, рассчитанный в результате обработки предшествующих событий.

В случае появления нового пакета данных, подлежащего передаче, указывается этот пакет B^* . Он мог быть сгенерирован в данном узле, в частности, в результате выполнения съемки или получен из другого узла. Во втором случае указывается узел N^* , из которого он был получен.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2. При первичном запуске алгоритма выполняется расчет начального фронта планирования и соответствующих пулов маршрутов. При последующих запусках фронт планирования и соответствующие ему пулы маршрутов обновляются только при изменении топологии сети.

Таблица 2
Table 2

Инициирование алгоритма маршрутизации Routing algorithm initiation

Событие	Входные параметры
• Установление контакта	
• Не установление контакта C • Окончание контакта C • Потеря контакта C ранее запланированного срока	$C^* = C$
• Появление нового пакета B	$B^* = B$
• Если пакет получен из узла N	$N^* = N$

Показателем изменения топологии является не пустое значение входного параметра — контакта C^* . Обновление фронта планирования сводится к выполнению следующих действий. Если есть пакеты, которые были запланированы к передаче в этом контакте, но оказались не переданными, они подлежат повторному планированию. При этом происходит замещение контакта C^* во фронте планирования следующим контактом C с тем же самым узлом и расчет пула маршрутов, начинающихся с этого контакта C . Процедура *Routing*, с помощью которой выполняется расчет пула маршрутов, рассматривается далее.

Примечание 1. На момент обновления фронт планирования может содержать следующий контакт C с тем же самым узлом, что и контакт C^* , и, как следствие, имеются рассчитанные пулы маршрутов через контакты C и C^* . В этом случае при обновлении фронта планирования происходит только удаление контакта C^* и соответствующего пула маршрутов.

Примечание 2. Есть несколько различных ситуаций, когда при удалении контакта какие-

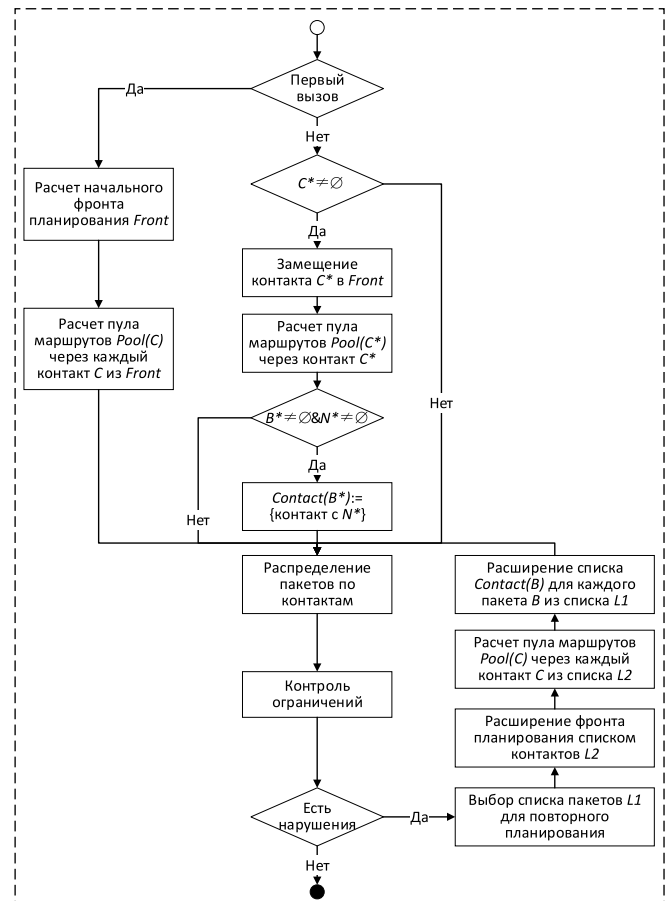


Рис. 2. Блок-схема алгоритма маршрутизации
Fig. 2. Block diagram of routing algorithm

то пакеты из очереди оказываются не переданными. К числу интуитивно понятных ситуаций относятся не установление контакта или преждевременная потеря контакта. При окончании контакта в запланированное время какие-то пакеты могут оставаться не переданными вследствие относительной точности расчета временных параметров плана передачи пакетов. Одна из возможных причин, почему абсолютно точный расчет невозможен, состоит в следующем. Передача очередного пакета начинается после получения служебного сообщения о подтверждении получения предыдущего пакета. В связи с этим передача пакетов фактически начинается позднее запланированного времени, и вследствие этого последний пакет (или пакеты) из очереди может оказаться не переданным до окончания времени контакта.

В последующей части алгоритма итеративно формируется (уточняется) план передачи пакетов: для каждого пакета выбирается маршрут и соответствующий контакт (первый контакт в маршруте) для его передачи, и для каждого контакта определяется порядок (очередь) передачи назначенных пакетов. Итерации состоят из двух шагов.

На первом шаге для каждого пакета, для которого не определен контакт, выбираются маршрут с наиболее ранним временем его доставки до узла назначения и соответствующий контакт. Выбор маршрута для пакета B выполняется с учетом того, что он не может использовать контакты из списка $Contact(B)$. Если пакет B был получен из другого узла N^* , то изначально в этот список вносится контакт, через который пакет B был передан в данный узел, так как выбор этого контакта для дальнейшей передачи пакета влечет нарушение ограничения (2) (см. раздел 2). Если в процессе планирования при выявлении нарушений ограничения (1) данный пакет B выбирается для повторного планирования, в этот список вносится контакт, который рассматривался на данной итерации.

Выбор маршрута и соответствующего контакта включает определение места пакета в очереди контакта, расчет времени начала и окончания его передачи и уточнение этих же временных параметров для всех последующих пакетов в очереди.

Контроль ограничения (1) выполняется на втором шаге итерации с помощью процедуры *Restriction control*, описание которой приводится далее. Проверка ограничений выполняется по-

сле распределения всех пакетов по контактам и расчета временных параметров их передачи и сводится к моделированию передачи пакетов. При выявлении нарушений ограничения (1) выбирается список $L1$ наименее приоритетных пакетов, удаление которых из очередей соответствующих контактов влечет удовлетворение этого ограничения (1). При этом выполняется определение списка контактов $L2$ для расширения фронта планирования и расчет соответствующих пулов маршрутов через эти контакты. Для каждого пакета B из $L1$ в его список $Contact(B)$ добавляется контакт, который рассматривался для его передачи на этой итерации. После этого выполняется повторное планирование передачи всех пакетов из списка $L1$.

Проверка ограничений (Restriction Control). Контроль ограничений сводится к моделированию передачи пакетов по выбранным маршрутам. Если в процессе моделирования выявляется нехватка остаточной возможности какого-то контакта или остаточной памяти узла, это соответствует нарушению ограничений. Листинг процедуры приведен на рис. 3.

Порядок моделирования определяется приоритетом пакетов и временем начала их передачи. В первую очередь выбираются пакеты с наибольшим приоритетом, а при одинаковых приоритетах — пакеты с более ранним временем начала передачи.

Для выбранного пакета последовательно выбираются контакты из маршрута его передачи (строка 3), и выполняется пересчет остаточных возможностей этих контактов и узлов, респондентов данных контактов. Расчет остаточных возможностей контакта и узла выполняется с учетом их использования при передаче предшествующих пакетов (строки 9, 10). Если в результате перерасчета остаточная возможность контакта или узла становится отрицательной (строка 11), это означает нарушение ограничений. В этом случае выполняется обратный перерасчет остаточных возможностей контактов и узлов маршрута, рассмотренных к данному моменту (строки 13—15), и данный пакет добавляется в список NBP_List для перепланирования.

После моделирования прохождения маршрутов всеми пакетами также формируется список контактов $C2List$ (строки 17—19), в результате чего требуется расширение фронта планирования.

Поиск маршрутов (Routing). Листинг процедуры *Routing* приведен на рис. 4. На началь-

ной стадии выполняется инициализация параметров алгоритма (строки 1–7). Все искомые маршруты должны начинаться с контакта узла N с узлом N^1 . Маршрут до узла N^1 соответственно состоит из контакта C^* (строка 3), и на основании этого определяется самое раннее время доставки данных в этот узел N^1 (строка 4). В качестве опорного узла x (строка 8) для первой итерации поиска маршрутов задается узел N^1 .

```

Вспомогательные параметры
•  $I = 1(1)n$  – порядковые номера пакетов для моделирования
• Route (I) – маршрут передачи пакета I
•  $V(I)$  – объем данных пакета I
•  $C(I, J) / J = 1(1)n^1$  – последовательность контактов в маршруте пакета I
•  $N(I, J) / J = 1(1)n^1$  – последовательность узлов в маршруте пакета I
• Cap (C) / Res_Cap (C) – исходная / остаточная пропускная способность контакта C
• Mem (N) / Res_Mem (N) – исходная / остаточная свободная память узла N

1 C List := ∅
2 For I = 1(1)n do
3   For J = 1(1)n1 do
4     If Res_Cap (I, J) = Cap (I, J)
5       then
6         Res_Cap (I, J) := Cap (I, J) – V(I)
7         Res_Mem (I, J) := Mem (I, J) – V(I)
8       else
9         Res_Cap (I, J) := Res_Cap (I, J) – V(I)
10        Res_Mem (I, J) := Res_Mem (I, J) – V(I)
11      If Res_Cap (I, J) < 0 or Res_Mem (I, J) < 0
12        then
13          for k = J(1)1
14            Res_Cap (I, J) := Res_Cap (I, J) + V(I)
15            Res_Mem (I, J) := Res_Mem (I, J) + V(I)
16          Add bundle to list (I, NPB_List)
17      For each B ∈ NBP_List
18        C := First contact of route (Route(I))
19        Add contact to list (C, C2List)

```

Рис. 3. Листинг процедуры Restriction Control
Fig. 3. Restriction Control procedure listing

```

Параметры
• N – узел, из которого выполняется поиск маршрутов
•  $N^1$  – узел, через который должны проходить искомые маршруты
•  $x, y$  – произвольный узел сети
•  $C^*$  – контакт узла N с узлом  $N^1$ 
•  $t^*$  – текущее время
•  $Set^1$  – список узлов сети за исключением узла N
•  $Set^2$  – список узлов, для которых определены кратчайшие маршруты
•  $Set^3$  – список узлов, для которых кратчайшие маршруты не определены
• Route to (x) – маршрут до узла x (последовательность контактов)
•  $L(x)$  – оценка самого раннего времени доставки пакетов в узел X

1  $Set^1 := \{N^1\}$ 
2  $Set^2 := Set - Set^1$ 
3 Route to ( $N^1$ ) :=  $\{C^*\}$ 
4  $L(N^1) := \max \{Start(C^*), t^*\}$ 
5 For each  $x \in Set^2$  do
6    $L(x) := \infty$ 
7   Route to (x) := ∅
8  $x := N^1$ 
9 While  $Set^2 \neq \emptyset$ 
10  Compute (Front(x, L(x)))
11  For each  $C \in Front(x, L(x))$  do
12     $y := Contact\ respondent(C)$ 
13     $t := \max \{L(x), Start\ contact(C)\}$ 
14    If  $t < L(y)$  then
15      Route to (y) :=  $\{Route\ to(x), C\}$ 
16       $L(y) := t$ 
17  Delete node from list (x,  $Set^2$ )
18  Add node to list (x,  $Set^1$ )
19   $x := \operatorname{argmin} x \in Set^2 / L(x)$ 
20 Create Pool ( $C^*$ )

```

Рис. 4. Листинг процедуры Routing
Fig. 4. Routing procedure listing

Итерация поиска (строки 9–19) начинается с определения фронта планирования для опорного узла с учетом параметра $L(x)$ (строка 10). На основании каждого контакта из фронта планирования определяется самое раннее время t доставки данных из опорного узла в узел y — узел респондент этого контакта (строка 13). Если это время t является более ранним по сравнению с текущим значением времени доставки в этом узле y , тогда для данного узла запоминается новый маршрут и обновляется параметр $L(x)$ (строки 15, 16).

На конечном шаге итерации опорный узел переносится из списка Set^2 в список Set^1 (строка 17) и определяется опорный узел для следующей итерации (строка 18). Им является узел из списка Set^2 с наиболее ранним временем доставки данных. По окончании поиска формируется пул найденных маршрутов $Pool(C^*)$.

4. Оценки преимуществ модификации CGR-подхода

Основным ожидаемым преимуществом является кратное сокращение объема вычислений, связанных с поиском маршрутов. В случае CGR-подхода список маршрутов рассчитывается заново при каждом изменении локальной топологии сети. При этом время расчета можно оценить по формуле

$$nt^1 + nkt^2,$$

где n — число узлов назначения, до которых надо найти маршруты; t^1 — время построения графа контактов; t^2 — время поиска наилучшего маршрута в графе контактов; k — число маршрутов, поиск которых выполняется в графе контактов. Пояснить данную формулу можно следующим образом. В CGR-подходе при каждом изменении топологии выполняется пересчет всех найденных ранее маршрутов. При этом для каждого узла назначения рассчитывается отдельный граф контактов, на основе которого с помощью необходимого числа итераций (k итераций) выполняется поиск соответствующего числа k наилучших маршрутов. Каждая следующая итерация отличается от предыдущей тем, что в графе контактов удаляется контакт с наиболее ранним временем начала, и на каждой итерации в полученном графе находится один наилучший маршрут. Более детальное описание этой методики поиска маршрутов можно найти в работе [23].

В модифицированном CGR-подходе в основе схемы поиска наилучших маршрутов рассматривается фронт планирования и соответствующее число пулов маршрутов до всех остальных узлов сети. В каждом пуле содержится по одному наилучшему маршруту до каждого другого узла сети. При этом при изменении локальной топологии сети требуется пересчет только одного пула маршрутов. Таким образом, время пересчета маршрутов оценивается длительностью всего лишь одной итерации поиска t^2 .

Второе ожидаемое преимущество состоит в следующем. Передача сообщений в CGR-подходе после установления контактов начинается по прошествии определенного времени, которое тратится на решение задачи маршрутизации. В модифицированном CGR-подходе план передачи сообщений рассчитывается (уточняется) до установления контактов. Таким образом, время контактов используется более эффективно.

Третье ожидаемое преимущество состоит в следующем. В случае CGR-подхода определение горизонта времени, в рамках которого выбираются контакты для построения графов, определяется эмпирическим образом, "с запасом времени". Выбор слишком короткого горизонта времени может привести к потере (не нахождению) каких-то наилучших маршрутов до узлов назначения. Вместе с тем выбор слишком длинного горизонта времени приводит к увеличению объема и времени вычислений. В модифицированном CGR-подходе задача выбора горизонта планирования не рассматривается вовсе. Вместо нее при необходимости выполняется расширение фронта планирования и расчет дополнительных пулов маршрутов.

Заключение

В статье предложена модификация CGR-подхода к маршрутизации данных в космической DTN-сети связи. С учетом используемых решений она может называться *Contact Plan Routing (CPR)*, маршрутизация на основе плана контактов. Предложенная модификация обеспечивает существенное повышение оперативности маршрутизации данных в целом по сравнению со стандартным CGR-подходом.

1. **Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K.** The EDSN Inter Satellite Communications Architecture // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14-WS1.
2. **URL:** https://www.nasa.gov/home/hqnews/2012/nov/HQ_12-391_DTN.html.
3. **URL:** [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_\(спутниковая_система_связи\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_(спутниковая_система_связи)).
4. **Yang P., Tian C., Yu Y.** Analysis on optimizing model for proactive ad hoc routing protocol // Proceedings of the IEEE Military Communications Conference. 2005. P. 2960—2966.
5. **Yassein M., Damer N.** Flying Ad-Hoc Networks: Routing Protocols, Mobility Models, Issues // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2016. Vol. 7, N. 6. P. 162—168.
6. **Singh J., Mahajan R.** Performance analysis of AODV and OLSR using OPNET // International Journal of Computer Trends & Technologies. 2013. N. 5. P. 114—117.
7. **Brown T., Doshi S., Jadhav S., Henkel D.** A full-scale wireless ad hoc network test bed // Proceedings of the International Symposium on Advanced Radio Technologies. 2005. P. 50—60.
8. **Kawakib K., Mohd H., Suhaidi H.** Survey and Comparison of Operating Concept for Routing Protocols in DTN // Journal of Computer Science. Vol. 12, N. 3. 2016. P. 141—152.
9. **URL:** <https://www.nasa.gov/directorates/heo/aes/index.html>.
10. **URL:** <https://tools.ietf.org/html/rfc4838>.
11. **Caini C.** 2 — Delay-tolerant networks (DTNs) for satellite communications // Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs) / Ed. J. Rodrigues. Oxford: Woodhead Publishing. 2015. P. 25—47.
12. **URL:** <https://tools.ietf.org/pdf/draft-burleigh-dtnrg-cgr-01.pdf>.
13. **Segui J., Jennings E., Burleigh S.** Enhancing contact graph routing for delay tolerant space networking // Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference. 2011. P. 1—6.
14. **Dijkstra E.** A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1, N. 1. P. 269—271.
15. **Bezergiannidis N., Caini C., Montenero D., Ruggieri M., Thauoussidis V.** Contact graph routing enhancements for delay tolerant space communications // Proceedings of the 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop. 2014. P. 17—23.
16. **Birrane E., Burleigh S., Kasch N.** Analysis of the contact graph routing algorithm: bounding interplanetary paths // Acta Astronautica. 2012. Vol. 75. P. 108—119.
17. **Madoery P., Fraire J., Finochietto J.** Congestion management techniques for disruption-tolerant satellite networks // International Journal of Satellite Communications and Networking. 2018. Vol. 36, N. 2. P. 165—178.
18. **Marchese M., Patrone F.** A source routing algorithm based on CGR for DTN-nanosatellite networks // Global Communications Conference, IEEE. 2017.
19. **Silva A., Burleigh S., Hirata C., Obraczka K.** A survey on congestion control for delay and disruption tolerant networks // Ad Hoc Networks. Vol. 25. Part B. 2015. P. 480—494.
20. **Fraire J., Finochietto J.** Design Challenges in Contact Plans for Disruption-Tolerant Satellite Networks // IEEE Communications Magazine. May 2015. Vol. 53. P. 163—169.
21. **Fraire J.** Introducing Contact Plan Designer: A Planning Tool for DTN-Based Space-Terrestrial Networks // 6th International Conference on Space Mission Challenge for Information Technology. 2017. P. 124—127.
22. **Madoery P., Fraire J., Raverta F., Burleigh S.** Managing Routing Scalability in Space DTNs // 6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments. 2018.
23. **Fraire J., Madoery P., Burleigh S., Feldmann S., Finochietto S., Charif A., Zergainoh N., Velazco R.** Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations // Journal of Computer Networks and Communications. Vol. 2017. Article ID 2830542. 18 p.

Modification of the CGR-Algorithm on Data Routing in a Communication Network of Satellite Constellation

O. V. Karsaev, karseav@ips-logistic.com,

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: **Karsaev O. V.**, Senior Researcher,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: karseav@ips-logistic.com

Accepted on October 01, 2019

Abstract

Communication networks in space systems involving the use of satellite constellations are DTN networks (Delay and Disruption Tolerant Networks). The establishment of communication channels in space communication networks has certain specifics: communication channels can be planned. In this regard, the CGR approach (Contact Graph Routing) is considered as the most promising solution to the problem of data routing. At the basis of this approach, taking into account this specificity, the calculation of the contact plan is considered. On the basis of this plan in the network nodes contact graphs are calculated, which are used to search the shortest data transmission routes. The paper proposes two interrelated solutions as a modification of this approach: the route search based on the contact plan, i.e. without calculation and use of the contact graph, and an adaptive method of finding the set of shortest routes required for routing. The essence of the first solution is as follows. In the standard CGR approach, the graph vertices correspond to the planned contacts between the network nodes, and the edges correspond to the data storage processes in the network nodes. In contrast, in the proposed approach, the vertices of the graph correspond to the nodes of the network, and the edges of the graph and their weight are determined dynamically, in the process of finding the shortest routes. The second solution is based on the concept of the planning front, which means a list of the closest contacts in time. The required routes are divided into a certain number of pools. Each pool combines the routes that use the specified contact from the planning front. The planning front is updated in two cases. If the network topology changes, the completed or not established contacts are replaced by subsequent ones with the same network nodes that are closest in time. If message traffic grows, a certain extension of the planning front and the use of additional route pools are performed. The article concludes with a description and justification of the expected advantages of the proposed approach.

Keywords: Satellite constellation, Delay-and-Disruption Tolerant Networks, Contact Graph Routing

Acknowledgement: The work is supported by RFBR (grant no. 18-01-00840).

For citation:

Karsaev O. V. Modification of the CGR-Algorithm on Data Routing in a Communication Network of Satellite Constellation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 75–85.

DOI: 10.17587/mau.21.75-85

References

1. **Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K.** The EDSN Inter Satellite Communications Architecture, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2014, SSC14-WS1.
2. **Available at:** https://www.nasa.gov/home/hqnews/2012/nov/HQ_12-391_DTN.html.
3. **Available at:** [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_\(спутниковая_система_связи\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_(спутниковая_система_связи)).
4. **Yang P., Tian C., Yu Y.** Analysis on optimizing model for proactive ad hoc routing protocol, *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference*, 2005, pp. 2960–2966.
5. **Yassein M., Damer N.** Flying Ad-Hoc Networks: Routing Protocols, Mobility Models, Issues, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, vol. 7, no. 6, pp. 162–168.
6. **Singh J., Mahajan R.** Performance analysis of AODV and OLSR using OPNET, *International Journal of Computer Trends & Technologies*, 2013, no. 5, pp. 114–117.
7. **Brown T., Doshi S., Jadhav S., Henkel D.** A full-scale wireless ad hoc network test bed, *Proceedings of the International Symposium on Advanced Radio Technologies*, 2005, pp. 50–60.
8. **Kawakib K., Mohd H., Suhaidi H.** Survey and Comparison of Operating Concept for Routing Protocols in DTN, *Journal of Computer Science*, 2016, vol. 12, no. 3, pp. 141–152.
9. **Available at:** <https://www.nasa.gov/directorates/heo/aes/index.html>.
10. **Available at:** <https://tools.ietf.org/html/rfc4838>.
11. **Caini C.** 2 – Delay-tolerant networks (DTNs) for satellite communications, *Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs)*, Ed. J. Rodrigues, Oxford, Woodhead Publishing, 2015, pp. 25–47.
12. **Available at:** <https://tools.ietf.org/pdf/draft-burleigh-dtnrg-cgr-01.pdf>
13. **Segui J., Jennings E., Burleigh S.** Enhancing contact graph routing for delay tolerant space networking, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, 2011, pp. 1–6.
14. **Dijkstra E.** A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, no. 1, pp. 269–271.
15. **Bezirciannidis N., Caini C., Montenero D., Ruggieri M., Thaoussidis V.** Contact graph routing enhancements for delay tolerant space communications, *Proceedings of the 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop*, 2014, pp. 17–23.
16. **Birrane E., Burleigh S., Kasch N.** Analysis of the contact graph routing algorithm: bounding interplanetary paths, *Acta Astronautica*, 2012, vol. 75, pp. 108–119.
17. **Madoery P., Fraire J., Finochietto J.** Congestion management techniques for disruption-tolerant satellite networks, *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 165–178.
18. **Marchese M., Patrone F.** A source routing algorithm based on CGR for DTN-nanosatellite networks, *Global Communications Conference*, IEEE, 2017.
19. **Silva A., Burleigh S., Hirata C., Obraczka K.** A survey on congestion control for delay and disruption tolerant networks, *Ad Hoc Networks*, 2015, vol. 25, Part B, pp. 480–494.
20. **Fraire J., Finochietto J.** Design Challenges in Contact Plans for Disruption-Tolerant Satellite Networks, *IEEE Communications Magazine*, May 2015, vol. 53, pp. 163–169.
21. **Fraire J.** Introducing Contact Plan Designer: A Planning Tool for DTN-Based Space-Terrestrial Networks, *6th International Conference on Space Mission Challenge for Information Technology*, 2017, pp. 124–127.
22. **Madoery P., Fraire J., Raverta F., Burleigh S.** Managing Routing Scalability in Space DTNs, *6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments*, 2018.
23. **Fraire J., Madoery P., Burleigh S., Feldmann S., Finochietto S., Charif A., Zergainoh N., Velazco R.** Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations, *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2017, Article ID 2830542, 18 p.

Г. П. Шибанов, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., gprshibanov@mail.ru,
Государственный летно-испытательный центр им. В. П. Чкалова, г. Ахтубинск

Автоматизированный контроль авиадвигателей в условиях их стендовых испытаний

Предложены общие принципы автоматизированного контроля авиадвигателей и функционально связанных с ними систем в условиях их стендовых испытаний. Данные принципы условно сводятся к шести последовательно реализуемым процедурам или этапам.

В соответствии с этими принципами контроль параметров авиадвигателей осуществляется автоматизированной системой контроля (АСК), выполненной на базе вычислительного комплекса, который реализует алгоритмы, построенные на основе булевой алгебры и алгебры событий и состояний. Данные алгоритмы позволяют процедуры контроля проводить в динамическом режиме в соответствии с графиком опробования авиадвигателя. При таком контроле в процессе испытания авиадвигателя соблюдается заданная очередность режимов работы без фиксации их по времени и с возможностью пропуска или повторения отдельных режимов. Контроль параметров на каждом очередном режиме работы авиадвигателя осуществляется лишь после того, как будут проконтролированы все параметры на предыдущем режиме, и основной определяющий параметр достигнет определенного для данного режима значения.

В период протекания переходных процессов контроль параметров проводится лишь в точках экстремумов значений основного определяющего параметра с фиксацией времени протекания переходных процессов и определением того, "в допуске" или "не в допуске" находится проверяемый параметр и зафиксированный временной интервал.

При поступлении от объекта контроля сигналов, время появления которых точно не известно, а известен лишь интервал времени, в течение которого они могут появиться, прекращается любой из режимов работы АСК, проводится допусковой контроль предусмотренных программой параметров и восстанавливается прерванный ранее режим. Одновременно с проведением допускового контроля параметров фиксируется время прихода указанных выше сигналов. Группа аварийных параметров контролируется непрерывно в течение всего периода проведения стендовых испытаний.

Ключевые слова: автоматизированный контроль, авиадвигатель, параметр, событие, состояние, стендовые испытания

Посвящается Елене Всеволодовне Григорин-Рябовой — научному редактору подготовленных мною и опубликованных издательством "Машиностроение" монографий

Авиационные двигатели практически всех конструктивных схем проходят большой цикл наземных испытаний на испытательных стендах. При этом циклограмма их проверки включает все без исключения режимы работы, на которых они должны в полном объеме функционировать в полете.

По мере развития вычислительной техники испытательные стенды и циклограммы испытаний авиадвигателей непрерывно совершенствовались и усложнялись, о чем говорит, например, перечень прилагаемых к статье опубликованных автором или при его непосредственном участии работ [1—16]. Все эти работы, как и работы других авторов по проблемам испытаний авиационных двигателей и доведения их до требуемого уровня, обоснованного в тактико-технических заданиях на их разработку, неизбежно ставят вопрос о необходимости иметь общие принципы стендовых испытаний. Представляется, что в основу указанных принципов должен быть положен единый подход к составлению циклограмм проверки авиадвигателей и функционально связанных с ними систем раз-

личной конструкции, которые в комплексе будем называть *объектом контроля*.

Применительно к контролю работоспособности авиадвигателей и функционально связанных с ними систем такими общими принципами, позволяющими сформулировать методику их контроля в условиях проведения стендовых испытаний, являются следующие:

1) проверка проводится в динамическом режиме в соответствии с графиком опробования и соблюдения наперед заданной очередности режимов без фиксации их во времени с возможностью пропуска или повторения отдельных режимов;

2) контроль параметров на некотором μ -м режиме осуществляется только в том случае, если проведена проверка всех параметров на $(\mu - 1)$ -м режиме;

3) измерение значений параметров в μ -м режиме проводится только после окончания переходных процессов, имевших место при переходе объекта контроля с $(\mu - 1)$ -го на μ -й режим его работы, и только в том случае, если основной определяющий параметр при выходе объекта

контроля на μ -й режим достиг определенного наперед заданного для данного режима значения;

4) в период протекания переходных процессов измерение значений параметров выполняется лишь в точках экстремумов значений основного определяющего параметра с фиксацией времени протекания переходных процессов и определением того, "в допуске" или "не в допуске" находится проверяемый параметр и зафиксированный временной интервал;

5) при приходе от объекта контроля сигналов, время появления которых точно не известно, а известен лишь интервал времени, в течение которого они могут появиться, прекращается любой из режимов работы автоматизированного средства контроля (АСК), проводится допусковый контроль предусмотренных программой параметров и восстанавливается прерванный ранее режим; при этом одновременно с проведением допускового контроля параметров фиксируется время прихода указанных выше сигналов;

б) группа аварийных параметров контролируется непрерывно в течение всего периода проведения стендовых испытаний.

Рассматривая перечисленные принципы с точки зрения булевой алгебры и алгебры событий и состояний, попытаемся сформулировать эти принципы применительно к их реализации с помощью АСК, построенной на базе цифровой вычислительной техники, которая бы в реальном масштабе времени могла решать не только математические, но и логические задачи с ис-

пользованием целого ряда специфических операторов. Для этого введем понятия "событие" и "состояние": если имеют место какие-либо два условия, одно из которых существует в течение времени Δt_1 , а другое — в течение времени Δt_2 , и $\Delta t_1 \gg \Delta t_2$, то первое условие будем называть *состоянием*, а второе — *событием*.

К *событиям* могут быть отнесены все командные и управляющие сигналы, в соответствии с которыми проводится запуск подлежащих испытанию объектов и АСК, переход с одних режимов работы на другие, прерывание и восстановление режимов и т.д., а к *состояниям* — режимы работы АСК и объектов контроля. Обозначим все события, которыми мы будем оперировать, строчными латинскими буквами, за исключением событий, состоящих в появлении управляющих сигналов, значение которых дано в работе [1]. Эти события обозначаются A_i , где $i = 1, 2, \dots, 9$.

Все состояния обозначим буквами греческого алфавита и для удобства пользования сведем их с соответствующими пояснениями смыслового содержания каждого из них в табл. 1. Аналогично обозначения всех событий, их условные наименования и пояснения по смысловому содержанию каждого из них сведем в табл. 2.

Весь процесс автоматизированного контроля работоспособности авиадвигателей и связанных с ними систем в динамическом режиме в наземных условиях может быть представлен как соответствующее чередование приведенных в табл. 1 и табл. 2 состояний и событий,

Таблица 1
Table 1

Условное обозначение и наименование состояния АСК и испытываемого авиационного двигателя
Designation and name of the state of ASK and test aircraft engine

Условное обозначение и наименование состояния	Смысловое содержание состояний АСК и объекта контроля
η — "ожидание"	Заключается в выдержке времени, необходимого для пропуска переходных процессов
δ_1 и δ_2 — "поиск по x_1 " и "поиск по x_2 "	Состояния, при которых проводится периодическое измерение и анализ приращений параметров x_1 и x_2 в целях определения экстремальных значений переходных процессов и выработки управляющих команд, позволяющих осуществить автоматическую привязку работы АСК к графику опробования проверяемого авиадвигателя и действиям оператора
θ_1 и θ_2 — "опрос по x_1 " и "опрос по x_2 "	Состояния, при которых для определения режима работы авиадвигателя проводится периодическое измерение параметров x_1 и x_2 до момента достижения ими наперед заданных значений
π — "измерение параметров"	Состояние, при котором проводится измерение и допусковый контроль параметров на установившихся режимах работы объекта контроля или в экстремальных точках исследуемых переходных процессов
λ — "внеочередное измерение параметров"	Соответствует режиму работы АСК, при котором из объекта контроля поступает приоритетный сигнал, прекращающий предыдущий режим
τ — "измерение времени"	Состояние, при котором проводится допусковый контроль временных интервалов и времени протекания переходных процессов, фиксация моментов появления различных сигналов, поступающих из автоматики объекта контроля в период проведения проверки его работоспособности, и выработка временных команд управления АСК (состояние τ существует одновременно с состояниями η , δ_1 и δ_2 , θ_1 и θ_2 , π и λ)

Условное наименование события и его смысловое содержание
Conditional name of the event and its semantic content

Условное обозначение и наименование события	Смысловое содержание события
a — "запуск проверяемого авиадвигателя (объекта контроля)"	Появление сигнала от кнопки запуска авиадвигателя и поступление его в пусковую панель (коробку)
b — "сигналы электроавтоматики запуска"	Появление сигналов от электроавтоматики проверяемого авиадвигателя в период его запуска (от момента нажатия кнопки запуска до выхода двигателя на режим "малый газ")
c — "конец поиска по x_1 "	Появление из системы управления сигнала, по которому вырабатывается команда, прекращающая состояние δ_1 автоматизированной системы контроля
d — "конец опроса по x_1 "	Появление управляющего сигнала в момент достижения параметром x_1 наперед заданного значения, по которому прекращается состояние θ_1 АСК
e — "конец ожидания"	Появление команд, по которым в определенные моменты времени прекращается состояние η АСК и осуществляется ее переход в другие состояния (θ_1, π, δ_2)
h — "конец измерения параметров"	Формирование сигнала, по которому прекращается состояние π АСК и переход ее к одному из состояний η, θ_1, δ_1 или δ_2
j — "приоритетный сигнал"	Приход из объекта контроля сигнала, время появления которого точно не известно, а известен лишь интервал времени Δt_j , в течение которого этот сигнал может появиться
q — "конец измерения времени"	Появление сигнала, по которому прекращается измерение и допусковый контроль временных интервалов
k — "экстремум"	Появление экстремума в анализируемом переходном процессе основного определяющего параметра, по которому ведется поиск
l — "срабатывание топливной автоматики"	Появление сигналов срабатывания автоматики топливной системы на режимах проверки времени запаздывания
r — "конец опроса по x_2 "	Появление управляющего сигнала, по которому прекращается состояние θ_2
v — "начало переходного процесса"	Появление переходного процесса
w — "конец переходного процесса"	Окончание переходного процесса
A_7 — "положительное приращение"	Переход кривой изменения значений основного определяющего параметра от горизонтального участка к наклонному, на котором данный параметр получает положительное приращение

укладывающихся по времени в период опробования авиадвигателя. При этом в соответствии с приведенными выше принципами каждое из состояний может быть выражено через другие состояния и события в виде соответствующих логических зависимостей, позволяющих достаточно просто осуществить программирование работы АСК в соответствии с графиком опробования проверяемого авиадвигателя.

Применительно к турбореактивным авиадвигателям, для которых в качестве основных определяющих параметров могут быть взяты всего два параметра, состояния $\eta, \theta_1, \theta_2, \delta_1, \delta_2, \pi, \tau$ можно представить через начинающие и заканчивающие их события в виде логических зависимостей:

$$\eta = (ab + d\bar{\pi}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_2 + h\bar{\theta}_1\bar{\delta}_1 + c\bar{\theta}_1\bar{\pi})(\bar{e}\bar{j}); \quad (1)$$

$$\theta_1 = (e\bar{\pi} + h\bar{\eta}\bar{\delta}_1 + c\bar{\eta}\bar{\pi} + r)(\bar{d}\bar{j}); \quad (2)$$

$$\theta_2 = (A\delta_2 A_7)(\bar{j}\bar{r}), \quad (3)$$

где A — оператор "после", означающий, что некоторое состояние (в данном конкретном случае δ_2) имело место до данного момента времени и что в данный момент оно прекратилось, а A_7 — событие, состоящее в появлении управляющего сигнала, значение которого дано в работе [1] и в булевых переменных представлено в виде логической зависимости

$$A_7 = \bar{\alpha}_{\text{вел}1}\bar{\alpha}_{\text{зн}1}\alpha_{\text{вел}2}\alpha_{\text{зн}2}, \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}_{\text{вел}1} = 0, \bar{\alpha}_{\text{зн}1} = 0, \alpha_{\text{вел}2} = 1, \alpha_{\text{зн}2} = 1$.

Черта сверху букв латинского и греческого алфавитов, использованных для обозначения аргументов в выражениях (1)–(4) и во всех других встречающихся по тексту выражениях, означает, что соответствующие события и состояния еще не наступили.

Оператор A может быть выражен через операторы H ("происходить") и N ("не") в виде

$$A\delta_2 = H\delta_2 N\delta_2. \quad (5)$$

Подставив соотношение (4) и (5) в выражение (3), получим

$$\theta_2 = [(H\delta_2 N\delta_2)(\bar{\alpha}_{\text{вел1}}\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\alpha_{\text{вел2}}\alpha_{\text{зн2}})](\bar{j}\bar{r}). \quad (6)$$

Учитывая, что δ_2 можно представить в виде зависимости

$$\delta_2 = (h\bar{\eta}\bar{\theta}_1\bar{\delta}_1 + d\bar{\delta}_1\bar{\eta}\bar{\pi})(\bar{j} + A_7), \quad (7)$$

после очевидных преобразований выражения (7) и подстановки в него выражения (4) получим

$$\delta_2 = (h\bar{\theta}_1 + d\bar{\pi})[\bar{j} + (\bar{\alpha}_{\text{вел1}}\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\alpha_{\text{вел2}}\alpha_{\text{зн2}})]\bar{\delta}_1\bar{\eta}. \quad (8)$$

Условия перехода АСК в состояния δ_1 , τ , π и ее пребывания в этих состояниях могут быть описаны зависимостями

$$\delta_1 = (h\bar{\eta}\bar{\theta}_1\bar{\delta}_2 + d\bar{\eta}\bar{\pi}\bar{\delta}_2 + q\bar{\eta})(\bar{j}\bar{c}) = [q + \bar{\delta}_2(h\bar{\theta}_1 + d\bar{\pi})]\bar{\eta}(\bar{j}\bar{c}); \quad (9)$$

$$\tau = (d + e + l + b)\bar{q}; \quad (10)$$

$$\pi = (e\bar{\theta}_1 + d\bar{q}\bar{\eta}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_2 + c\bar{\eta}\bar{\theta}_1 + k)\bar{h}\bar{j}. \quad (11)$$

Остановимся на некоторых наиболее важных особенностях реализации приведенных логических зависимостей и рассмотрим зависимости, реализуемые при переходе АСК в состояние λ .

В периоды времени, соответствующие пребыванию АСК в состояниях δ_1 или δ_2 , возможны случаи пропуска отдельных режимов работы объекта контроля, причем в АСК должна быть предусмотрена возможность пропуска как одного, так и нескольких режимов одновременно. Пропуск же одного, двух или n режимов работы объекта контроля представляет собой переход от $(\mu - 1)$ -го к $(\mu + 1)$ -му режиму, минуя μ режим, или переход к $(\mu + 2)$ -му режиму, минуя μ -й и $(\mu + 1)$ -й режимы, или, наконец, переход к $(\mu + n)$ -му, минуя все режимы от μ -го до $\mu + (n - 1)$ -го.

Пусть $(\mu - 1)$ -й режим есть режим, предшествующий моменту, начиная с которого человек-оператор по тем или иным причинам может проводить опробование либо на μ -м, либо на $(\mu + n)$ -м режимах, минуя все режимы от μ -го до $[\mu + (n - 1)]$ -го. Тогда переход АСК на режимы работы, соответствующие μ -му, либо $(\mu + n)$ -му режимам работы объекта контроля, может быть представлен как некоторое событие g через двоичные функции p_μ и $p_{\mu + n}$ истинности μ -го и $(\mu + n)$ -го режимов в следующем виде:

$$g = p_\mu + p_{\mu + n}, \quad (12)$$

где функции p_μ и $p_{\mu + n}$ принимают значения "1", если в момент перехода объекта контроля с $(\mu - 1)$ -го режима имеем соответственно μ -й и $(\mu + n)$ -й режимы, и значение "0" во всех остальных случаях.

Анализ процесса перехода объекта контроля с $(\mu - 1)$ -го на μ -й или $(\mu + n)$ -й режимы работы, проведенный на примере турбовинтового и двухроторного турбореактивного авиадвигателей, показывает, что такого рода переход сопровождается появлением событий A_7 либо A_6 . Первое из них представлено логической зависимостью (4), а второе в соответствии с работой [1] через булевы переменные представляется в виде выражения $A_6 = \bar{\alpha}_{\text{вел1}}\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\alpha_{\text{вел2}}\bar{\alpha}_{\text{зн2}}$, причем

$$p_\mu = \bar{p}_{\mu-1}A_7; \quad (13)$$

$$p_{\mu+n} = \bar{p}_{\mu-1}A_6, \quad (14)$$

где p_μ и $p_{\mu + n}$ — двоичные функции истинности $(\mu - 1)$ -го режима, равные 1, когда имеет место $(\mu - 1)$ -й режим, и равные 0 при наличии любых других режимов работы объекта контроля. Подставляя соотношение (13) и (14) в выражение (12), найдем

$$g = \bar{p}_{\mu-1}A_7 + \bar{p}_{\mu-1}A_6. \quad (15)$$

Учитывая, что согласно дистрибутивному закону булевой алгебры

$$\bar{p}_{\mu-1}A_7 + \bar{p}_{\mu-1}A_6 = \bar{p}_{\mu-1}(A_7 + A_6),$$

представим выражение (15) в виде

$$g = \bar{p}_{\mu-1}(A_7 + A_6). \quad (16)$$

Учитывая далее, что $A_7 = \bar{\alpha}_{\text{вел1}}\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\alpha_{\text{вел2}}\alpha_{\text{зн2}}$ и $A_6 = \bar{\alpha}_{\text{вел1}}\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\alpha_{\text{вел2}}\bar{\alpha}_{\text{зн2}}$, окончательно получим

$$g = \bar{p}_{\mu-1}(\bar{\alpha}_{\text{вел1}}\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\alpha_{\text{вел2}}\alpha_{\text{зн2}} + \bar{\alpha}_{\text{вел1}}\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\alpha_{\text{вел2}}\bar{\alpha}_{\text{зн2}}). \quad (17)$$

При переходе от одного режима работы объекта контроля к другому на некотором достаточно малом интервале времени $\Delta t = m$, представляющем собой минимальное время переходного процесса, которое может быть зафиксировано АСК, нельзя сказать, что μ -й режим работы объекта контроля закончился и, вместе с тем, что следующий за ним $(\mu + 1)$ -й режим еще не начался. Приход объекта контроля в состояние, соответствующее $(\mu + 1)$ -му режиму его работы с учетом данной особенности может быть определен оператором E ("приход") через операторы N ("не") и D ("задержка"):

$$Ep_{\mu+1} = p_{\mu+1}ND^m p_{\mu+1} (p_{\mu+1}, \text{ но еще не } D^m p_{\mu+1}), (18)$$

а выход из состояния, соответствующего μ -му режиму, — оператором L ("уход"):

$$Lp_{\mu} = Np_{\mu}D^m p_{\mu} (\text{не } p_{\mu}, \text{ но еще } D^m p_{\mu}). (19)$$

Тогда переход объекта контроля из одного состояния в другое может быть определен как "уход" из первого состояния, соответствующего μ -му режиму его работы, и "приход" во второе состояние, соответствующее $(\mu + 1)$ -му режиму, т.е. это событие может быть описано выражением

$$C(p_{\mu}, p_{\mu+1}) = Lp_{\mu}Ep_{\mu+1} = (Np_{\mu}D^m p_{\mu})(p_{\mu+1}ND^m p_{\mu+1}). (20)$$

Одной из основных задач, решаемых АСК в процессе "поиска" по одному из определяющих параметров, является установление факта наличия переходного процесса и фактов наличия экстремумов в переходном процессе.

Если обозначить $S(v, w)$ двоичную функцию наличия переходного процесса, принимающую значение 1 при $v = 1$ и 0 при $w = 1$, то задача установления факта наличия переходного процесса будет сведена к отысканию значений функции $S(v, w)$. Последняя же может быть выражена через операторы "не" (N) и "задержка" (D) в виде

$$S(v, w) = Nw[v + D^m S(v, w)]. (21)$$

"Приход" основного определяющего параметра, по которому ведется "поиск", к экстремальному значению можно выразить как

$$Ek = kND_k^m. (22)$$

Появление же самого события k возможно тогда и только тогда, когда имеет место переходный процесс [$S(v, w) = 1$] и одновременно с этим произошло событие $A_8 = \alpha_{\text{вел}1}\alpha_{\text{зн}1}\alpha_{\text{вел}2}\bar{\alpha}_{\text{зн}2}$ или $A_9 = \alpha_{\text{вел}1}\bar{\alpha}_{\text{зн}1}\alpha_{\text{вел}2}\alpha_{\text{зн}2}$, причем, если произошло событие A_8 , то имеет место минимум (min), а если A_9 , то максимум (max). Обозначив соответственно k_1 и k_2 события, состоящие в появлении min и max в анализируемом переходном процессе, можно записать:

$$k_1 = [S(v, w)]A_8; (23)$$

$$k_2 = [S(v, w)]A_9. (24)$$

Входящее в выражения (23) и (24) значение $S(v, w)$ определяется из выражения (21). События A_8 и A_9 могут быть представлены в соот-

ветствии с работой [1] как функции двоичных аргументов в отображенном выше виде.

Для описания состояния λ АСК введем, кроме упоминавшихся ранее операторов E ("приход"), L ("уход"), A ("после"), N ("не") и H ("происходить"), операторы F_j и V^t . Под оператором F_j ("допусковый контроль параметров по приоритетному сигналу") будем понимать оператор, означающий, что после прихода из объекта контроля приоритетного сигнала и прерывания существовавшего до его прихода состояния АСК проводится измерение и допусковый контроль некоторой предусмотренной программой группы параметров ($x_{1\mu}, x_{2\mu}, \dots, x_{v\mu}$), соответствующей μ -му режиму работы объекта контроля, а под оператором V^t — оператор появления приоритетного сигнала на некотором интервале времени t .

Если обозначить $Z(j)$ двоичную функцию, которая может принимать значение 1 в любой из моментов времени, лежащий в пределах временного интервала Δt_j всего один раз, соответствующий приходу приоритетного сигнала, т.е. соответствующий истинности события j , то можно записать

$$Z(j) = V^{\Delta t_j}(j). (25)$$

Обозначим далее $C(P, \lambda)$ двоичную функцию перехода АСК из некоторого ее состояния P , существовавшего до прихода от объекта контроля приоритетного сигнала, в состояние λ , а $C(\lambda, P)$ — двоичную функцию восстановления ранее прерванного состояния P и учтем то обстоятельство, что переход от состояния λ к состоянию P осуществляется только после окончания контроля параметра $x_{v\mu}$, т.е. параметра, последнего в данной группе параметров, подлежащих контролю на μ -м режиме работы объекта контроля, при котором поступил приоритетный сигнал. Тогда, согласно приведенному выше определению состояния λ , приход АСК в это состояние, пребывание в нем и выход из него могут быть описаны некоторой двоичной функцией

$$\Lambda = V^{\Delta t_j}(j)C(P, \lambda)F_j(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \dots, x_{v\mu}) \times \\ \times A[F_j(x_{v\mu})]H[C(\lambda, P)]. (26)$$

Если под t понимать промежуток времени, достаточный для перехода АСК из состояния P в состояние λ или наоборот, то входящие в выражение (26) функции $C(P, \lambda)$ и $C(\lambda, P)$ могут

быть выражены через операторы E ("приход") и L ("уход") зависимостями, аналогичными (20), т.е.

$$C(P, \lambda) = LPE\lambda = (NP D^m P)(\lambda N D^m \lambda); \quad (27)$$

$$C(\lambda, P) = L\lambda EP = (N\lambda D^m \lambda)(P N D^m P), \quad (28)$$

а оператор $H[C(\lambda, P)]$ может быть представлен в виде

$$\begin{aligned} H[C(\lambda, P)] &= C(\lambda, P) + D^m H[C(\lambda, P)] = \\ &= (L\lambda EP)[D^m H(L\lambda EP)] = \\ &= (N\lambda D^m \lambda)(P N D^m P) + \\ &+ D^m H[(N\lambda D^m \lambda)(P N D^m P)]. \end{aligned} \quad (29)$$

Считая, что измерение и допусковый контроль каждого параметра из группы параметров $(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \dots, x_{v\mu})$ занимает одно и то же время Δt , причем такое, что $\Delta t \leq m_1$, можем записать

$$F_j(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \dots, x_{v\mu}) = D^{m_1} x_{1\mu} D^{m_1} x_{2\mu} \dots D^{m_1} x_{v\mu}. \quad (30)$$

Наконец, оператор $A[F(x_{v\mu})]$ может быть представлен в виде выражения, аналогичного (4):

$$A[F_j(x_{v\mu})] = H F_j(x_{v\mu}) N F_j(x_{v\mu}). \quad (31)$$

Подставляя выражения (27)–(31) в формулу (26), получим

$$\begin{aligned} \Lambda = V^{\Delta t_j}(j) &= [(N P D^m P)(\lambda N D^m \lambda)] \times \\ &\times (D^{m_1} x_{1\mu} D^{m_1} x_{2\mu} \dots D^{m_1} x_{v\mu}) [H F_j(x_{v\mu}) N F_j(x_{v\mu})] \times \\ &\times \{[(N\lambda D^m \lambda)(P N D^m P)] + \\ &+ D^m H[(N\lambda D^m \lambda)(P N D^m P)]\}. \end{aligned} \quad (32)$$

Ввиду специфичности задачи, решаемой при реализации зависимости (32), в составе АСК должна быть предусмотрена специальная приоритетная схема, которая выполняла бы весь цикл операций, связанных с приходом из объекта контроля приоритетных сигналов.

Рассмотренный выше алгоритм (зависимости (1), (2), (6), (8)–(11), (17), (20), (23)–(24), (32)) устанавливает связь между отдельными состояниями АСК и режимами работы объекта контроля и может быть рекомендован для автоматической привязки состояний АСК к циклограмме проверки работоспособности различных типов авиадвигателей и функционально связанных с ними систем.

Список литературы

1. Шибанов Г. П. Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение, 1973, 424 с.
2. Шибанов Г. П., Башкиров Г. С., Васильев А. Ф. и др. Способ контроля работоспособности авиадвигателя и связанных с ним систем в динамическом режиме в наземных условиях. Автор. свидет. СССР № 153843 с приоритетом от 9 мая 1962.
3. Шибанов Г. П., Башкиров Г. С., Васильев А. Ф. и др. Система автоматизированного контроля работоспособности авиадвигателя и связанных с ним систем в динамическом режиме в наземных условиях. Автор. свидет. СССР № 153844 с приоритетом от 9 мая 1962.
4. Шибанов Г. П., Васильев А. Ф., Березовой Н. И. Устройство для анализа формы кривой переходного процесса. Автор. свидет. СССР № 167680 с приоритетом от 13 ноября 1962.
5. Шибанов Г. П., Парусов К. Н. Цифро-аналоговый безмоторный стенд для испытаний топливрегулирующей аппаратуры авиационных двигателей. Автор. свидет. СССР № 219833 с приоритетом от 14 февраля 1967.
6. Шибанов Г. П. Устройство для распознавания формы кривой. Автор. свидет. СССР № 238247 с приоритетом от 14 декабря 1967.
7. Шибанов Г. П., Парусов К. Н. Автоматическое устройство для одновременного контроля температуры газов за турбиной и оборотов турбины турбореактивного двигателя. Автор. свидет. СССР № 241111 с приоритетом от 1 февраля 1968.
8. Шибанов Г. П. Способ обнаружения и прекращения помпажа турбореактивного двигателя. Автор. свидет. СССР № 266474 с приоритетом от 5 февраля 1968.
9. Шибанов Г. П. Система для распознавания составной объект контроля. Автор. свид. СССР № 261780 с приоритетом от 17 декабря 1968.
10. Шибанов Г. П., Адгамов Р. И., Дмитриев С. В. и др. Система для контроля параметров авиадвигателей. Автор. свидет. СССР № 442733 с приоритетом от 5 января 1972.
11. Шибанов Г. П., Адгамов Р. И., Дмитриев С. В. и др. Автоматизация испытаний и контроля авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1977. 280 с.
12. Шибанов Г. П., Адгамов Р. И., Боровик В. О. и др. Обработка и анализ информации при автоматизированных испытаниях газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.
13. Шибанов Г. П., Адгамов Р. И., Дмитриев С. В. и др. Автоматизированные испытания в авиационной технике. М.: Машиностроение, 1989. 426 с.
14. Шибанов Г. П. Испытания авиационной техники // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 4. С. 36–44.
15. Шибанов Г. П. Оценка определяющих параметров газотурбинных двигателей в процессе автоматизированных испытаний // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 6. С. 20–23.
16. Шибанов Г. П. Автоматизация процесса защиты газотурбинных двигателей от помпажа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 9. С. 644–647.

Automatic Control of Aircraft Engine in Conditions of Stand Test

G. P. Shibanov, e-mail: gshibanov@mail.ru,

The Chkalov State Test Flight and Development Center, Akhtubinsk, Russian Federation

Corresponding author: Shibanov Georgi P., D. Sc., Professor, Head Scientist Researcher,
e-mail: gshibanov@mail.ru

Accepted on October 18, 2019

Abstract

The general principles of automatic control of aircraft engines and functionally related systems in the conditions of their stand tests are suggested. These principles are prospectively reduced to six sequentially implemented procedures or steps. In accordance with these principles, the control of aircraft engine parameters is carried out by a computer-aided test equipment (CTE) based on a computer complex that implements algorithms based on Boolean algebra and the algebra of events and states. These algorithms allow control procedures to be carried out in dynamic mode in accordance with the schedule of testing an aircraft engine. With this control, the specified sequence of operating modes of the aircraft engine undergoing testing is observed without fixing them in time and with the possibility of skipping or repeating individual modes. Parameters are monitored at each of the next aircraft engine operating modes only after all parameters are checked in the previous mode and the value of the main determining parameter reaches the value determined for this mode. During the period of transient processes, parameters are controlled only at the points of extremum of the values of the main determining parameter with fixing the time of transient processes and determining that. "In the tolerance" or "not in the tolerance" is the checked parameter and the fixed time interval. Upon arrival of the signals from the monitoring object, the time of occurrence of which is unknown, and only the time interval during which they can appear is known, any of the CTE operation modes are terminated, tolerance control of the parameters provided by the program is performed, and the previously interrupted mode is restored. Simultaneously with the tolerance control of the parameters, the time of arrival of the above signals is recorded. The group of emergency parameters is monitored continuously throughout the entire period of stand test.

Keywords: automated control, aircraft engine, parameter, event, condition, stand tests

For citation:

Shibanov G. P. Automatic Control of Aircraft Engine in Conditions of Stand Test, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 86–92.

DOI: 10.17587/mau.21.86-92

References

1. Shibanov G. P. Recognition in car control systems, Moscow, Mashinostroyeniye, 1973, 424 p. (in Russian).
2. Shibanov G. P., Bashkirov G. S., Vasiliev A. F. et al. A method for monitoring the operability of an aircraft engine and related systems in dynamic mode under ground conditions, Author. witness USSR No. 153843 with a priority of May 9, 1962 (in Russian).
3. Shibanov G. P., Bashkirov G. S., Vasiliev A. F. et al. The system of automated control of the performance of an aircraft engine and related systems in dynamic mode in ground conditions. Author. witness USSR No. 153844 with priority of May 9, 1962 (in Russian).
4. Shibanov G. P., Vasiliev A. F., Berezova N. I. A device for analyzing the shape of a transient curve, Author. witness USSR No. 167680 with priority of November 13, 1962 (in Russian).
5. Shibanov G. P., Parusov K. N. A digital-analog non-motorized bench for testing the fuel control equipment of aircraft engines, Author.witness. USSR No. 219833 with a priority of February 14, 1967 (in Russian).
6. Shibanov G. P. A device for recognizing the shape of a curve, Author.witness. USSR number 238247 with a priority of December 14, 1967 (in Russian).
7. Shibanov G. P., Parusov K. N. An automatic device for simultaneously monitoring the temperature of the gases behind the turbine and the turbine speed of the turbojet engine, Author. witness USSR No. 241111 with a priority of February 1, 1968 (in Russian).
8. Shibanov G. P. A method for detecting and stopping surging turbojet engine, Author. witness USSR No. 266474 with a priority of February 5, 1968 (in Russian).
9. Shibanov G. P. A system for recognizing the states of a control object. Author. Testimonial, USSR No. 261780 with a priority of December 17, 1968 (in Russian).
10. Shibanov G. P., Adgamov R. I., Dmitriev S. V. et al. A system for controlling the parameters of aircraft engines. Author. witness USSR No. 442733 with a priority of January 5, 1972 (in Russian).
11. Shibanov G. P., Adgamov R. I., Dmitriev S. V. et al. Automation of testing and control of aircraft gas turbine engines, Moscow, Mashinostroyeniye, 1977, 280 p. (in Russian).
12. Shibanov G. P., Adgamov R. I., Borovik V. O. et al. Processing and analysis of information during automated testing of gas turbine engines, Moscow, Mashinostroyeniye, 1987, 216 p. (in Russian).
13. Shibanov G. P., Adgamov R. I., Dmitriev S. V. et al. Automated tests in the aircraft industry, Moscow, Mashinostroyeniye, 1989, 442 p. (in Russian).
14. Shibanov G. P. Tests of aircraft, *Flight Safety Problems*, 2008, no. 4, pp. 36–44 (in Russian).
15. Shibanov G. P. Assessment of the determining parameters of gas turbine engines in the process of automated testing, *Automation. Modern technologies*, 2016, no. 6, pp. 20–23 (in Russian).
16. Shibanov G. P. Automation of the process of protecting gas turbine engines from surging, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 644–647 (in Russian).

S. F. Sergeev, sspost@mail.ru,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation

Corresponding author: Sergeev Sergey F., Professor, Dr. of Psychology Sciences, Head of Scientific and Research Laboratory of "Ergonomics of Complex Systems", Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: sspost@mail.ru

Accepted October 26, 2019

Artificial Intelligence in Mechatronic Systems: Problems of Embodiment*

Abstract

The article deals with the issues related to the possibility and limitations of technological creation of artificial systems endowed with consciousness and acting subject existing in the world of artificial subjective reality. The problems of creating an artificial personality in the given parameters are shown. The main obstacle to the creation of intelligent systems is the lack of progress in our understanding of the nature and mechanisms of the brain in the process of generating mental image and organization of purposeful activities. The transfer of psychology data to the engineering sphere is ineffective due to the difference in conceptual and instrumental areas of these disciplines. The approaches of synthetic psychology and pedagogy designed to provide a solution to the problem of creating an artificial subjective reality and techno-genic modification of man are presented.

Keywords: artificial subjective reality, artificial consciousness, artificial senses, synthetic psychology, self-organization, convergent and divergent technologies

Acknowledgments: The work was carried out in the framework of the state task of the Ministry of education and science of the Russian Federation No. 25.8444.2017/БЧ.

For citation:

Sergeev S. F. Artificial Intelligence in Mechatronic Systems: Problems of Embodiment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 93–101.

УДК 004.8

DOI: 10.17587/mau.21.93-101

С. Ф. Сергеев, д-р психол. наук, проф., заведующий НИЛ, sspost@mail.ru,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Искусственный разум в мехатронных системах: проблемы воплощения*

Рассматриваются вопросы, связанные с возможностью и ограничениями технологического создания искусственных систем, наделенных сознанием и действующим субъектом, существующим в мире искусственной субъективной реальности. Показаны проблемы создания искусственной личности в заданных параметрах. Основным препятствием к созданию разумных систем является отсутствие прогресса в нашем понимании природы и механизмов работы головного мозга в процессе порождения психического образа и организации целенаправленной деятельности. Перенос данных психологии в инженерную сферу малоэффективен в силу различия понятийных и инструментальных областей данных дисциплин. Представлены подходы синтетической психологии и педагогики, призванные обеспечить решение проблемы создания искусственной субъективной реальности и техногенной модификации человека.

Ключевые слова: искусственная субъективная реальность, искусственное сознание, искусственные органы чувств, синтетическая психология, самоорганизация, конвергентные и дивергентные технологии

Introduction

The dominant themes of the defining part of the scientific and technological discourse of modern engineering knowledge of the last decade and, in particular, robotics, one way or another, are connected with the problem of the human factor and the problem of creating complex technical systems endowed with artificial intelligence in their capa-

bilities identical or superior to the human mind. In the case of robotics, we are talking not only about intelligent, but also about intelligently operating in social systems and communications artificial machines and mechanisms. At the same time, the categories of "intelligence" and "mind" are often considered synonymous by the engineering and technical community, despite the deep, repeatedly noted in the Humanities, fundamental differences in their content and conceptual structure [1, 2]. The sources of humanity's aspiration to the world of "intelligent machines" are the General dissatisfaction of

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 25.8444.2017/БЧ.

man with himself and attempts to find a replacement for him in the complex technological world, which imposes special requirements on man, far exceeding his physical, psychophysiological and mental capabilities. Along with the development of technologies and means of communication, the process of human integration with the emerging intellectual techno-genic environment of the planetary scale is observed [3, 4].

The problem of symbiosis of man with the man-made world created by him becomes especially relevant when we talk about the expansion of the human mind into new environments of experience, manifested, inter alia, in the exploration of outer space, macro — and micro-worlds of the physical world, in aggressive and harmful to human forms and conditions of activity. Questions of interaction between man and technology inevitably arise in the creation of complex systems and managed complexes. For example, in the study and colonization of the planets of the solar system and the exploration of deep space, the problems of interaction in space robotics, management of automated technical systems and technologies serving planetary bases and production require their solution. The problems of the unity of man and technology in the harsh conditions of space are becoming particularly complex and relevant.

The solution to the problem of "man in the techno-genic world" is seen by most scientists and engineers only in the technological aspect and is reduced to the creation of artificial intelligence superior to human capabilities. At the same time, technology is seen as a catalyst for progress, as a friendly environment that enhances the capabilities of mankind, as a compass and a guide for development. This is a rather dangerous point of view, removing control over technological development. Forgotten are the warnings of Cybernetics founder Norbert Wiener, who believed that "excessive fascination with technology can seriously damage the environment, which we will learn soon enough or never know—we will no longer be." Excessive faith in science and optimism create and maintain among the population and part of the scientific and technical workers faith in the limitless possibilities of mankind, enjoying the fruits of man-made civilization [5]. We are convinced that there are practically no spheres of human activity where the achievements of techno-science forming convergent complexes of NBICS technologies and their variants uniting interdisciplinary fields of humanitarian and technical knowledge are used [6, 7]. Civilization is moving to the point of technological singularity, in which technological progress will become inaccessible to our understanding and will be carried out by artificial intelligence, which in turn will be integrated with techno-modified man through computer and neurocomputer interfaces and virtual environments [8, 9].

In the future go to the past as a biological species becomes technobiod. The evolution of the man-made environment of human civilization of planet

Earth, its penetration into all levels of society, the human body and psyche is global in nature, accompanied by organized increase in the level of inter-system integration, the incarnation on Wednesday, intelligence, and friendliness to man, emerging technobiotic unity. The expansion of life, leading to the emergence of a complex symbiosis of man and the environment created by him through technology, can be considered as the next stage in the development of the noosphere, generating a planetary self-organizing unity — technobiod. Its influence on man and humanity differs from the opinion widespread in modern humanitarian and sociological discourse about the self-organizing action of autopoietic communication, which constitutes and determines the observed forms of human society. Technobiod is an evolving system, building its own individual history, but it is not the history of society and man, and techno-biological symbionts. At the same time, models operating with ideal ideas about the social evolution of human civilization cease to work, in which the leading role is played by individual scientific and collective creative abilities of a person, generating an environment that has the properties of the noosphere of V. I. Vernadsky. Technobiod becomes an independent self-organizing system object, generating forms of symbiotic and artificial intelligence and their hybrids, in which the once leading role of the individual human mind gradually fades into the background. Separating from the biosphere, man becomes an intelligent element of the evolving techno-genic world, in which individual behavior and human activity lose their decisive importance for the processes of technobiod development. Man becomes an element of a new planetary system unity regulated by the mechanisms of self-organization, which includes in its development active-reflexive processes of Assembly and evolution of systems of different nature. Previously unknown techno-social catalytic forms are formed, which dramatically accelerate the emergence of new and utilization of old system objects of organized complexity. Processes of generation of the active self-organizing environment of activity of mankind are observed. The initial phases of the development of a new technobiotic civilization can be associated with the phenomenon of multi-environmental self-organization, leading to the points of singularity. They violated all previously existing laws, and assumptions about the future are unknown and uncertain. Everything makes no sense. And even a scientific understanding of what is happening also has no significance for the emergence of a new quality of a complex organization [10].

For the first time the term "singularity" in a technological context was used by Stanislaw Ulam in an obituary dedicated to the memory of John von Neumann. It describes a conversation with von Neumann about "the constantly accelerating progress of technology and changes in human life that lead to

the approach of a significant singularity in historical development, beyond which human activity in the forms known to us will not be able to continue" [11]. The current stage of development of human civilization, at first glance, confirms this hypothesis. Previously inaccessible technologies and products have appeared, reflecting our knowledge of the nature of things in a wide range of space, energy and time. These are nano- and biotechnologies, Internet, cellular communication, robotic systems, and artificial intelligence technologies. They reflect the progress and opportunities for the synthesis of science and technology. One gets the impression of unlimited possibilities of technogenic civilization. However, this is not entirely true. Despite the considerable efforts of the scientific community, using the most advanced devices and equipment, no one has managed to understand the sources of human development and civilization, and, explain, the determining role in them of the moral and spiritual foundations of the world around us. There is a certain rejection of technology and science from man, which become independent entities, devoid of any form of social control. This is quite dangerous because of the possible uncontrolled development of situations leading eventually to the destruction of humanity.

The public consciousness is dominated by forms of technocratic thinking and intelligence. The thesis of their superiority over their social and biological forms is supported. According to V. P. Zinchenko, "Technocratic thinking is a worldview, the essential features of which are the primacy of the means over the goal, the private goal over the meaning and universal interests, the symbol over the being and realities of the modern world, technology (including psychotechnics) over man and his values. Technocratic thinking is Reason, which is alien to Reason and Wisdom. For technocratic thinking there are no categories of morality, conscience, human experience and dignity. An essential feature of technocratic thinking is the view of a person as a trainable, programmable component of the system, as an object of a wide variety of manipulations, and not as a person, which is characterized not only by self-activity, but also freedom in relation to the possible space of activities" [12].

Our worldview has changed dramatically over the past decades of technological development. The world is no longer as mechanistic, predictable and simple as it was represented in our minds in the models of the classical natural Sciences. It is complex and diverse, with probability and chance, quantum entanglement and nonlocality, dark energy and matter, and models and technologies that change our understanding of the nature of time and space.

Attempts to use all these achievements of natural science are ineffective in studying the phenomena of the human soul and psyche. An experiment, even if it is a thought experiment or a fact of self-observation, instantly changes a person's psychic reality. His

consciousness becomes different. The phenomena given to us directly in sensory experience stubbornly defy experimental investigation. We do not know the methods and technologies that allow us to study directly the content and basic mechanisms of the human psyche, its subjective sphere. Attempts to study the functions and structure of the brain give rather modest results and in practical terms are suitable only in medicine for the diagnosis of pathological conditions of the body. Despite technological progress, we are still far from understanding the work of the human psyche and the mechanisms of its implementation. This state of the psychological Sciences hinders progress in the technological implementation of artificial intelligence and intelligence.

The main problem in the scientific study of mental content is due, apparently, its holistic, integral nature. Because of this, the basic tools of science based on analysis, observation and measurement do not work well in psychology. Also, modeling and experimental methods, well-proven in the natural Sciences, are ineffective. The scientific analysis of the psychic and the consequent reduction of the content destroy the synthetic properties of the living, transforming it in its models and relations into a collection of complex, hierarchically connected, but dead and lifeless elements and structures. Disappears mentioned above the whole system-defined notion of "soul". This gave rise to the famous domestic psychologist V. P. Zinchenko generate Maxim that "psychology sacrificed his soul for the sake of objectivity of its subjective science" [13]. Psychologists do not deny the existence of the soul, but refrain from studying it, giving the palm in this matter to religion. Because of this, the main achievements of psychology are associated with the study of only behavioral characteristics of a person, indirectly indicating the work of his psyche. This is not enough to solve the problem of creating artificial human analogues.

It should also be noted that theoretical psychology is increasingly losing its psychological content, giving the baton to the currently fashionable cognitive psychology, which uses cybernetic and information metaphors and approaches in the study of human physiological reactions to stimulus material. Hypotheses about physiological determinants of the brain determining the forms of mental reflection of reality are exploited [14, 15]. A complex of disciplines, calling themselves cognitive Sciences, is actively developing, based on the ideas of cognitive neuroscience, which has absorbed all the illusions, errors and expectations of physiological psychology, the technological continuation of which they are. The use of new technologies of computer analysis of neurophysiological indicators of the active brain and methods of visualization of the results in fact do not change anything in our knowledge of the psyche compared to the results obtained in the last century on simpler experimental facilities.

Gentleman's set of modern researcher of the human brain and psyche includes computed tomography, multi-channel electroencephalography, magnetic resonance imaging, magnetoencephalography and transcranial magnetic stimulation. With their help, a huge amount of experimental data is obtained, the free interpretation of which is the essence of neuroscience. It allows us to describe in a new language any known facts of human behavior, but does not explain their essence. The models created within the framework of new technologies are very far in their essence from the object of psychology research — a person acting in the world, transforming and cognizing the world and nature. They do not solve the main problem of consciousness—the problem of qualia, which consists in explaining the qualitative subjective experiences experienced by a person in various mental States [16]. Despite the huge amount of experimental material accumulated in neuroscience, the nature and forms of connections arising in the physiological structure of the brain with the qualia of subjective reality are still insufficiently studied. The real person deals with the psychic reality including the subjective world and the subject operating in it in the form of the personality experiencing in the multimodal form the whole spectrum of internal and external sensory, mental and sensual phenomena, living the difficult social and personal life, showing human qualities, showing phenomena of creativity, tops of human spirit. All this has been studied so far on a descriptive level, beyond the explanation of their essence and connection with the physical world that generates them.

For the sake of justice it is necessary to recognize that thanks to development of natural Sciences and psychology many secrets of the live nature inaccessible to our direct perception and common sense are solved. We already know a lot about the structure of the human body, its biology and physiology, psyche. However, we know almost nothing about the soul. Here the achievements of science are quite modest. According to V. P. Zinchenko, "no one has ever managed to uncover the mechanism of the miraculous, to attack the absolute (not only in the field of psychology)... the soul cannot be reduced to knowledge, feeling and will. The soul is a mysterious excess of knowledge, feeling and will, without which their full development is impossible" [13, p. 4]. Psychology, using the methods of the natural Sciences, has learned in its constructs and models to dissect the living psychic whole into parts, but the reverse synthesis of them into a whole is still inaccessible to us. The main problems of the human "I", consciousness, creative and cognitive capabilities of man, his creative activity, goal-setting in activity, permeating the entire pyramid of psychological knowledge, without which it is difficult to talk about the creation of artificial intelligence, remain unresolved.

Problems of techno-modification of human psyche and creation of systems with artificial intelligence

The creation of human-like intelligent technical systems and robots, their inclusion in the social life of mankind, involves serious changes in the social and personal life of man and society, causing problems of a moral nature without the solution of which it would be rash to talk about the emergence of these systems. Endowing them with the properties of a reflective system that generates an artificial "I" can cause social conflicts and the struggle of artificial systems with man, which nourishes the authors of science fiction literature and cinema.

The philosophical reflection of the consequences of technological intervention in the processes of biological and social evolution of man is reflected in the ideas of transhumanism, which is an intellectual and cultural movement, a system of views that support the use of new data of science and technology to increase the cognitive and physical abilities of man. An advanced radical version of transhumanism is presented in the concept of posthumanism [17].

The concept of "transhumanism" was created by the founder of UNESCO biologist Julian Huxley (Julian Huxley) in his essay "Transhumanism", published in the collection "New bottles for new wine" (1957). He from positions of global evolutionism considered possible technological self-improvement of the person. "The human race," according to Huxley, "can, if it wants to, surpass itself, and do it not only sporadically: someone in one thing, someone in something quite different, but quite differently, on the scale of humanity as a whole. We need to give a name to this new belief. Perhaps, the word transhumanism will fit here: a person will remain a person, but will surpass himself, realizing the new possibilities of his own nature" [18, p. 17].

The first problem of transhumanism is related to its philosophical basis. Transhumanism as a radical form of materialistic worldview reflects excessive technocratic optimism, supported mainly by representatives of engineering and natural science knowledge and quite easily refers to deep psychological phenomena. Its adherents consider it possible to copy the mind with the help of a technological procedure that allows you to transfer the ideal content of the living brain to other, not only biological, carriers. This form of philosophical reflection is reflected in the form of vulgar total cognitivism, whose proponents consider the phenomena of mind and psyche to be purely informational processes, and man to be a computer algorithmic biological system.

Theoretically, transhumanism is essentially a new concept of human evolution in modern conditions. The transhuman is declared to be a transitional type, as a new being that has arisen thanks to modern advances in science and technology. Transhumans do not have to be future-oriented or the most tech-

nologically savvy people, nor do they have to be aware of their "connecting role in evolution." They have signs of self-identification and active personality, have improved body implants, asexual, reproduce artificially, have a distributed personality [19].

One of the unsolved problems of transhumanism is related to the self-organizing nature of the living, which prevents the management of these processes from the outside. Because of this, the actions associated with the construction of the living are technological intervention in processes that have internal logic and mechanisms of existence. As a result, the basic structures that determine the work of the mechanisms of life can be damaged.

Criticism of transhumanism is mainly concerned with emerging ethical and moral issues in relation to "failed products of technomodification". First of all, it concerns genetic engineering, which contradicts the "will of God" and "violates the natural order of nature" [20]. According to E. V. Vvedenskaya — "transhumanists clearly dominate the belief in the incredible prospects of technical improvement of mankind and there is no critical analysis of the negative consequences of this, taking into account the existential risks that undermine the foundations of existence, as an individual and human society" [20, p. 39]. "Radical genetic modification of the biological nature of man, according to the expectations of transhumanists, is only a stage in the further development of human autoevolution, when the synthesis of man and machine will have to be realized, by introducing artificial implants and chips into the body and brain. Man, according to transhumanists, goes into the past as a biovid and goes into the future as a technovid. The world of pathological artificiality kills all living things in man, he constructs himself, determines his physical quality. In the consciousness of the post-man, the boundary between the real and the artificial is dismantled, not only his corporeality disappears, but also the true individual "I" [ibid.].

From the point of view of bioethics, "the main contradiction in transhumanism is the denial of moral perfection of man and the reduction of his essence only to the improvement of somatic and cognitive characteristics" [ibid.]. Close arguments about the violation of the boundaries of the human Self and the disappearance of the subject in the process of technomodification of the body and brain are present in E. V. Mareva — "If nanotechnology and imitation of living tissue make it possible to replace the human brain, will the person retain his individuality, personality? After all, why would I want the immortality of my body if it wasn't me? If personality is a derivative of bodily organization, we lose it by changing the body. If the personality is a derivative of communication with similar, not only contemporaries, but also ancestors through the world of culture, it is possible to assume that other existence will affect spiritual well-being, but it will be my self-consciousness

and well-being by means of the "repaired" brain as means, but not essence of my I" [21, p. 173].

According to A. I. Crimina "you can often find synonymous understanding of transhumanism and post-humanism. Although these philosophies work with modern constructs and use similar terminology, their interpretations are fundamentally different. The discourse of transhumanism refers to the Cartesian juxtaposition of soul and body. Despite the sacralisation of the technological and the purification of the Posthuman from such seemingly permanent attributes of the living as aging and death, transhumanism largely continues the ideas of the Enlightenment. In the understanding of posthumanists, the subject is nomadic and represents an Assembly of the human, animal, digital, chimerical. Thus violated the main Maxim of humanism about man as the highest value-man in posthumanism ceases to be "the measure of all things" [17]. Posthumanism leads to the idea of the Posthuman and considers the equality of man, nature and society as co-evolving self-organizing entities.

At the same time, a number of scientists consider human techno-evolution inevitable and find a solution to this problem in strengthening the humanitarian component of technological knowledge. According to V. I. Arshinov and A. L. Andreev, "if we consider engineering activities in relation to the prospects for the development of techno-science and sociotechnical design, it is quite natural that the question of a significant expansion of engineering competence due to the enrichment of its social knowledge may arise. For it is social science that is called upon to clarify and bring to the consciousness of man the values, motives and images that are implicitly laid in the basis of various programs, projects and directions of techno-science, as well as to model future "social worlds" that will arise during the evolution of the techno-sphere created by the activity of mankind" [22].

Our rather limited knowledge of the human soul is accompanied by the currently observed major technological breakthrough in the natural Sciences and convergent technologies and their applications. And this is quite dangerous, because it causes the technocratic part of humanity to replace the natural evolution of man with technological intervention in his body and nature. "Scalpel" is already created, but who and how will use it? For many people, the answer seems obvious — it's robotic systems and "smart" technologies of the future, superior to the natural intelligence of man and his imperfect mind. Only they will allow overcoming a barrier of technological complexity of arising tasks. But unfortunately, we are not ready for a radical but well-considered action. The development of the techno-genic environment of modern civilization is accompanied by the emergence of the problem of increasing its complexity, intelligence, intellectuality. Special forms of intelligence are required, different from the natural human

intelligence, which arose and focused on solving the problems of human biological survival. We do not know the technology to obtain them. The progress observed in the last decade in the technologies of information transmission and processing, unfortunately, also does not automatically lead to the emergence of appropriate quality and efficiency of intelligent software tools, still working on deterministic algorithms of situational control.

The use of machine learning technologies, which are currently developing intensively, is considered by many experts as the beginning of a genuine intellectualization of the world of machines. However, the fundamental limitation of this technology is the inability of the machine to independently choose a training algorithm, since an infinite number of regularities can be obtained from a finite set of data. Among them will be algorithms with which the machine will cope badly. This forces us to turn to the study of the mechanisms of self-organization of experience in learning technical systems, leading to the possible quasi-social development of systems with artificial consciousness and cognitive development of the world, but what will be the result of machine socialization is unclear to us. Perhaps it will be a machine repetition of human history, in which there is no place for man.

The question of creating systems with artificial consciousness becomes relevant in the problem of the "smart world", replacing the problem of artificial intelligence, experiencing a conceptual crisis. The fact is that the limitations of the intelligence of an algorithmically functioning artificial system are related to the limitations of its Creator, reducing his experience into an algorithm. A system with artificial consciousness can potentially form a subject-actor capable of self-learning and assimilation of social experience of various communities available to him through language and behavior more effective than a person. However, we cannot say what kind of personality will be formed in the process of social and personal self-organization, and what goals it will set for itself? Having free will, it can consider a person an extra link and take appropriate measures.

Most of all, from an engineering point of view, it would be possible to copy the information about the personality of a living person, preferably wise professional and social experience and implement it into a technical system that creates conditions for the maintenance and continuation of the process of mental self-organization ensuring the existence of a self-organizing self, which is equivalent to the transfer of the soul to other carriers. However, everything is not as simple as, for example, in a cybernetic system, the program of which does not depend on the computer implementing it. A digital copy of a computer program is absolutely no different from the original, which allows you to copy it in unlimited quantities. The mental content of a person is unique,

due to its continuously evolving depending on the conditions of life psychophysiological structure and self in the form of an acting subject. This leads to the fundamental impossibility of simultaneous and complete fixation of the state of all structures and processes of the brain involved in the creation and maintenance of the mental. The solution of this problem at the present stage of development of science and technology is difficult, according to some authors, almost insoluble problem. In the process of measuring some States of the structure of the brain, other parts of it will pass into a new state, as a result of which the continuity of the process of mental regulation will disappear. There can be no reflective subject, which determines the further direction of development and form of the mental process. Hypothetically, it can be assumed that a working model of the mental process will be created with a permissible error, in which all the basic properties of the original are preserved. However, we do not know with what accuracy the real brain functions, supporting the mental content of a particular person, and how stable it is when changing the physical parameters of the brain. Indirect observations indicate the existence of a wide range of stable mental processes that preserve the "I" of a person, ensuring his self-identification even with fairly extensive brain lesions after serious diseases and even clinical death [23]. However, no one has been able to find a direct physical connection between the phenomena of subjective reality and the neurodynamic systems of the brain, although it is the hypothesis of the presence of communication is the basis of almost all information models of the brain. In the center of attention of researchers there are two main questions of "difficult problem": if to phenomena of subjective reality it is impossible to attribute physical properties — weight, energy, spatial characteristics — how to explain 1) their communication with brain processes and 2) their causal action on corporal processes. These questions within the framework of the information concept of consciousness are investigated by Professor D. I. Dubrovsky. He introduced two initial assumptions:

1) Information must be embodied in its material, physical carrier (i.e. does not exist outside and in addition to it);

2) Information is invariant with respect to the physical properties of its carrier (one and the same information can be embodied and transmitted by different physical properties of carriers [16], the principle of information causality Introduced by the author is designed and allows to circumvent the physical limitations of information carriers forming the content of the human psyche.

To substantiate the information approach, D. I. Dubrovsky hypothesized the existence of neurodynamic codes that determine the existence of qualia. Every qualia is necessarily embodied in its neural code, does not exist outside and in addition to it [24].

Modern models of the mental view it as the result of the brain, which is a biological computer, included in multiple relationships with physical reality, presented in consciousness as a virtual subjective reality. The problem of the subject as an active participant in the life process, carrying out its activities in the context of interaction with the objective world is the most difficult to understand and implement in terms of technology. The possibility of creating an ego-system with a subject acting in it can be attributed to poorly studied both theoretically and practically. Much says that it is a form of information self-organization arising in the phenomenal field of consciousness.

It is possible to assume possibility of realization and work of the following mechanism of generation of the artificial subject environment (the world of reality of the artificial subject) on the basis of two-stage model of reducing consciousness (Sergeev S. F., Sergeeva A. S., 2016) [25]. In accordance with it, the perceptual systems of the artificial organism at the first stage of its development continuously carry out the process of reduction of the stream of distinctions coming from the physical world, turning it into a finite set of interacting autopoietic variants of the States of the inner world, accompanied by the appearance of the reflecting subject and his subjective reality. At the same time the condition of consistent existence of the physical process generating them is observed. There are internal and external forms of the closed cyclic process of transformations of external in internal and internal in external. It can be assumed that an artificial system with similar properties is quite possible to implement technically in the form of a hybrid cyber-biological form implementing the principle of re-entry (Edelman J.) [26] and the postulates of the theory of information synthesis (Ivanitsky A. M.) [27]. According to them, the brain maintains a continuous recursive cyclic process of parallel multidimensional comparison of signals coming to the brain from the brain and the external environment. In cyclic repetition of operations of comparison of input and output signals of system the reaction of the arising subject to the external world is reflected also. The inner form of the world of the artificial subject is analogous to, but not identical with, the subjective world of man. The difference is that the vital needs of the living organism, which form the activity and motivational spheres, are embodied in the human subject and his world. The organism itself creates a subjective reality for its needs. Subjective history forms occur in the life process of a subject, his experience is determined by selective engagement of a dynamic information system of the brain, bounding the infinite or a very large variety of possible, which is the subject automatically options world. The selected variants exist in the subject's implicit memory as a cloud of possibilities in a potential, timeless form. Each of the variants can be actualized, constructed and reproduced

in the form of a time sequence of the current reality of the subject (in its subjective time and subjective form), reflecting the actual state of the subject in consciousness. In the memory of the subject is stored not all the experience, but only the markers that trigger the standard independent biological generators that make up the network structure that implements the picture of the world and the subject. It should be noted that functional independence, standard behavior and topological organization of generators contribute to maintaining the spatial-temporal and modal integrity and stability of the subjective picture of the world.

Consciousness in accordance with the logic of its functioning chooses from the existing in the subconscious reduced set of possible options for the development of the individual world the most necessary and close at the moment option, which is implemented and used to ensure the self-preservation of the organism and writing the history of the world and the life of the subject. Thus, there is a two-stage process of forming the image of physical reality. At the first stage, a base of options is created that do not contradict the conditions of existence of the autopoietic process of consciousness and the observed world (the experience of the subject), and at the second — one of its options is realized, reproduced in a conscious form.

Note that not all States of the physical world can be used in the elements of autopoietic self-organization of consciousness. Manifests the selective nature of the psyche. At the second stage of reduction there is an organization of available autopoietically consistent variants of development of history of the subject. They are reflected in consciousness in the phenomena of the thinking subject. It should be noted that the subject evaluates not only the options of his fate, but also chooses acceptable options according to the criteria reflected in his personal organization, which arises under the influence of social orientations created by social mechanisms of self-organization.

The given model focuses on the important role of the need-motivational sphere of a person creating conditions for the emergence of a reflective subject and its development in the process of life. How to provide such mechanisms in an artificial system is not entirely clear? A reflective artificial conscious system can function only through self-learning in the context of its interaction with social or learning systems. In this case, an artificial personality is formed, playing the role of an active agent that determines conscious behavior and cognitive activity. The introduction of moral codes created by humanity can be destructive for the psyche of the artificial subject, which will lose important for the reflexive system meanings of self-preservation, organizing and supporting the life of the subject.

According to Thomas Metzinger, the human Ego and its subjective reality are complex representational phenomena developed as a result of evolu-

tion, the result of a process of automatic dynamic multilevel self-organization. Ultimately, subjective experience is a biological data format, a highly specific way in which information about the world is presented as our knowledge. But there is no such thing as the Ego in the world. The biological organism as Such is not the Ego. It is only a form of the content of representations—namely, the content of the transparent Self-model activated in the brain of the organism [28]. Despite the apparent paradox of Metzinger's hypothesis, it should be noted that it is supported by a significant number of studies and experiments demonstrating the formation and transformation of the subjective picture of the world [29, 30 and 31]. In particular, they show the role of synchronization between multisensory perceptual signals with the observed form of bodily self-consciousness, developing in childhood and manifested in a sense of presence in the world.

Metzinger's research provides a fundamental opportunity for the creation and existence of systems with artificial subjective reality on non-biological media, which raises a number of problems of a technological and ethical nature, which can be solved only by the methods of future techno-Humanities, which can be conditionally called synthetic pedagogy and psychology [32]. These are scientific and practical disciplines that will inevitably arise and will study the processes of learning, self-learning and socialization in artificial, aware of their existence in the world systems with artificial or hybrid subjective reality. At present, this area of knowledge is completely unexplored. We can only outline the approximate range of problems that will be dealt with in these disciplines. First of all, it is a problem of the artificial picture of the world created by the techno subject in the course of its development in the conditions of integration of artificial sensory-perceptual systems and accumulation of experience. The creation of artificial sensory systems that perceive different from human spectra of physical influences will lead to the emergence of a special ecological niche of an artificial being and special forms of relations between him and man. In the consciousness of the artificial individual, a multidimensional image of the reality in which he acts arises, and this reality can be strikingly different from the human one. Synthetic psychology is a discipline cross-border with synthetic biology and studies the methods of creation and consequences of social and other existence of mental structures implemented with the help of various technologies, including artificial Assembly. The problems of creation of intelligent systems including those with specified or previously unknown functions and properties are considered.

One of the important questions of this discipline will be the question of the minimum possible structure that generates the psyche and stable forms of

consciousness. In addition, the psychological characteristics of a modified person endowed with:

- artificial organs and sensory systems (including new functions and properties);
- artificial emotions;
- artificial consciousness;
- artificial memory (hybrid, distributed and embodied in information environments, etc.).

Note that now we do not know much about the essence of the emerging artificial mental phenomena, the ranges and boundaries in which they exist, which would allow us to move to the solution of technological problems of techno-modification of the man and the creation of artificial intelligence. To date, the creation of interface associations "man-machine" did not affect the essential features of subjective reality, namely:

- multi-media character, manifested in the integrity of perceptions and the presence of qualitative organization, reducing the spectra of physical effects on perceptual systems in subjective images;
- presence of space-time structure and event character of changes reflecting cause-and-effect relations of the objective World;
- the Presence of the subject playing the role of an active observer and actor.

Intervention in the perceptual sphere of a person, the expansion of its capabilities allows the cognitive system of a person to more effectively use the ranges of electromagnetic waves inaccessible to the natural senses. However, at present this operation is performed only by hardware conversion of the ranges of interest to perceptually accessible forms using electro-optical converters, thermal imagers, night vision devices, ultrasonic sonars, etc.). The introduction of new sensory forms into the subjective sphere of man from the moment of his birth will require the creation of a new sphere of engineering and humanitarian knowledge, which can be called *sensory engineering*.

Technomodification of subjective reality is a form of purposeful change of properties of subjective reality of the person by means of technologies, and here the main role is played by technologies of genetic engineering and neurobiology which reflect a materialistic picture of the world. The relationship between mental and physical States and processes is studied. However, many scientists deny the possibility of "reduction" of mental phenomena to processes in the Central nervous system [33]. According to them, the mental controls the physiological processes of the brain, which create the conditions for the emergence of mental regulation.

The psychology of emerging artificial sensory forms in addition to human psychology in the natural world is taking its first steps and it is very important that it does not fall victim to technocratic ideas about life.

Artificial senses lead to the appearance of artificial additional modalities in the consciousness and

subjective reality of the modified person. Additional or modified senses are possible. It is important how they can be integrated into a consistent picture of the world of the subject, providing him with the right and opportunity for a happy and dignified life.

Note that systems with artificial consciousness are systems that generate their subjective world and generate an acting subject, realizing the goals of their existence. The concept of "subject" reflects the properties of a holistic self-organizing system endowed with a mechanism of consciousness, oriented in the world manifesting the properties of personality. However, it is impossible to know what kind of personality will be formed in the process of artificial life, since it is the result of the evolution of a self-organizing system, interference in the work of which destroys the mechanism of self-organization.

Popular in the engineering environment, the idea of endowing a reflexive artificial system with the necessary personality traits does not take into account the holistic nature of the personality, its non-reducibility to the sum of independent traits. For example, in the model of V. A. Wittich, a person in the social ergatic system proposed by Him is considered as a rather limited being whose personal properties can be neglected [34]. The author left him only functions "atomic Holon" and opportunities manifestations of "sense of solidarity". This is clearly not enough for systems that model the behavior of an active person.

In conclusion, we can conclude that humanity is only at the initial stage of creating systems like living systems endowed with consciousness and reason. Solving these problems will require the mobilization of the scientific community in the field of natural Sciences, Humanities and technical Sciences.

References

1. **Sergeev S. F.** On the way from bio-organization to cyber-organization: man in the shadow of artificial intelligence, *Natural and artificial intelligence: methodological and social problems* / ed. by D. I. Dubrovsky and V. A. Lektorsky, Moscow, "Canon+", ROOI "Rehabilitation", 2011, pp. 48–59 (in Russian).
2. **Sergeev S. F.** Psychological foundations of the problem of artificial intelligence, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 7, pp. 2–6 (in Russian).
3. **Global future 2045.** Convergent technologies (NBICS) and transhumanistic evolution, Ed. by D. I. Dubrovsky, Moscow, IBA Publishing house, 2013, pp. 158–168 (in Russian).
4. **Cheklezov V. V.** Sense of the planet (Internet of Things and the next technological revolution), Moscow, Russian research center for the Internet of Things, 2013 (in Russian).
5. **Stanislaw Lem.** *Summa Technologiae*. Minneapolis, MN, University of Minnesota Press, 2013. 448 pp.
6. **Bykov E.** NBIC-convergence of technologies: a historical review. Part I: 2001–2006, *NBIS-Nauka. Technologies*, 2017, no. 1, pp. 12–24 (in Russian).
7. **Bykov E.** NBIC-convergence of technologies: a historical review. Part II: 2007–2013, *NBIS-Nauka. Technologies*, 2017, no. 2, pp. 24–36 (in Russian).
8. **Vinge Vernor** (30–31 March 1993), The Coming Technological Singularity, Vision–21: Interdisciplinary Science & Engineering in the Era of Cyberspace, *Proceedings of a Symposium held at NASA Lewis Research Center (NASA Conference Publication*

CP-10129), retrieved 2007-08-07. See also this HTML version, retrieved on 2009-03-29.

9. **Kurzweil R.** *The Singularity Is Near*, New York, Viking, 2005.
10. **Sergeev S. F.** Reflexive autoevolution of global intelligent technogenic environments, in *Reflexive Processes and Management*, Proceedings of the IX International Symposium October 17–18, 2013, Moscow, Rev. ed. Moscow: "Kogito-Center", 2013, pp. 245–248 (in Russian).
11. **Ulam Stanislaw** (May 1958). Tribute to John von Neumann, 64, #3, part 2, *Bulletin of the American Mathematical Society*: 5.
12. **Zinchenko V. P.** Psychological bases of pedagogy (Psychological and pedagogical bases of construction of system of developing training D. B. Elkonin, V. V. Davydov), Moscow, Gardariki, 2002, 431 p. (in Russian).
13. **Zinchenko V. P.** Reflections on the soul and its education (Hour of the Soul), *Expanded version of the report at the International Symposium "Spirituality of childhood"*, Machida (Japan) August 21–22, 2001, 2001, 33 p. (in Russian).
14. **Kratin Yu. G.** Neurophysiology and theory of reflection, Leningrad, Nauka, 1982, 84 p. (in Russian).
15. **Sergin V. Ya.** Consciousness and thinking: neurobiological mechanisms, *Psychological journal of the international University of nature, society and man "Dubna"*, 2011, no 2, available at: <http://www.psyanima.ru> (in Russian).
16. **Dubrovsky D. I.** The problem of the ideal. Subjective reality, Moscow, Canon+, 2002, 368 p. (in Russian).
17. **Kriman A. I.** Idea of the Posthuman: a comparative analysis of transhumanism and posthumanism, *Philosophical science*, 2019, 62(4), pp. 132–147 (in Russian).
18. **Huxley J.** *Transhumanism*, in Huxley, J., *New Bottles for New Wine*, London, Chatto & Windus, 1957, pp. 13–17.
19. **Hayry M.** Categorical objections to genetic engineering – a critique, *Ethics and Biotechnology* / eds. A. Dyson and J. Harris, L.; N. Y., Routledge, 1994, pp. 202–215.
20. **Vvedenskaya E. V.** Bioethical analysis of the contradictions of transhumanism, *Vestnik MITHT, Series: Social and Humanitarian Sciences and ecology*, no. 3, 2014, pp. 35–40 (in Russian).
21. **Mareeva E. V.** From artificial intelligence to artificial soul, *Questions of Philosophy*, 2014, no. 1, pp. 171–177 (in Russian).
22. **Arshinov V. I., Andreev A. L.** Technoscience and the problem of man, *Vestnik MEI*, 2011, no. 4, pp. 110–116 (in Russian).
23. **Litvak L. M.** "Life after death": near-death experiences and the nature of psychosis: the experience of self-observation and psychoneurological research / ed. article by D. I. Dubrovsky. Ed. 2nd, remade and additional, Moscow, Canon+, 2007, 671 p. (in Russian).
24. **Dubrovsky D. I.** Problem of neurodynamic code of mental phenomena, *Questions of Philosophy*, 1975, no. 6, pp. 84–95 (in Russian).
25. **Sergeev S. F., Sergeeva A. S.** Man in complex technical systems: the problem of consciousness, *Proceedings of the Second International scientific and practical conference "Human factor in complex technical systems and environments" (Ergo-2016)* (St. Petersburg, Russia, 6–9 July 2016), St. Petersburg: interregional ergonomic Association, PEIPK, Severnaya Zvezda, 2016, pp. 66–72 (in Russian).
26. **Edelman G.** *The Remembered Present: A Biological Theory of Consciousness*, N. Y., Basic Books, 1989.
27. **Ivanitsky A. M.** Synthesis of information in key departments of the cortex as the basis of subjective experiences, *Journal of higher nervous activity*, 1997, vol. 47, no. 2, pp. 209–225 (in Russian).
28. **Metzinger T.** (2009). *The ego tunnel: the science of the mind and the myth of the self*. New York, NY, US, Basic Books.
29. **Blanke O., Orriège S., Landis T., Seeck M.** Stimulating illusory own-body perceptions, *Nature*, 2002, vol. 419, pp. 269–270.
30. **Lenggenhager B., Tadi T., Metzinger T., Blanke O.** Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness Science 24 August 2007, vol. 317, no. 5841, pp. 1096–1099.
31. **Maselli A., Slater M.** (2014). Sliding perspectives: dissociating ownership from self-location during full body illusions in virtual reality. *Frontiers in Human Neuroscience* 8:693.
32. **Sergeev S. F.** Psychology of technointegration and technomodification of man: theoretical and methodological basis, *Actual problems of labor psychology, engineering psychology and ergonomics*, iss. 8, ed. A. A. Oboznov, A. L. Zhuravlev, Moscow, Publishing house "Institute of psychology RAS", 2018, pp. 30–49.
33. **The Self and Its Brain: An Argument for Interactionism** by Karl R. Popper and John C. Eccles, Berlin, Springer-Verlag, 1977, xvi + 597 p.
34. **Witte V. A.** Kognitologiya developing systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 10, pp. 45–50 (in Russian).

К. Ф. Тагирова, д-р техн. наук, проф., tagirovakf@yandex.ru,
И. Ф. Нугаев, д-р техн. наук, доц., inugaev@yandex.ru,
Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа,
ООО НИИ Технических систем "Пилот", г. Уфа

Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин*

Статья посвящена анализу актуальных задач автоматизации управления установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) нефтедобывающих скважин и современные подходы к их решению. Показано, что решение задачи управления УЭЦН требует создания сложных многоуровневых систем (АСУ УЭЦН). Рассмотрен двухуровневый подход к построению АСУ УЭЦН, включающей в себя планирующий и оперативный уровни управления, где планирующий уровень вырабатывает требования к параметрам режима работы УЭЦН, обеспечивающим оптимальные показатели добычи нефти, а оперативный уровень обеспечивает их реализацию. Приведены подходы к построению структуры и алгоритмического обеспечения указанных уровней управления. Рассмотрен подход к реализации планирующего уровня управления на базе кустового информационно-вычислительного центра, взаимодействующего с отдельными группами скважин месторождения, а также с информационно-вычислительным центром месторождения, реализующим координирующее управление месторождением в целом. Рассмотрен подход к построению оперативного уровня управления на основе формирования таких подсистем, как подсистема вывода на режим работы, обеспечивающая переход УЭЦН на оптимальный режим; подсистема регулирующего управления, обеспечивающая поддержание параметров режима работы в условиях возмущающих воздействий; подсистема аварийного управления, предотвращающая возникновение отказов. Рассмотрены подходы к построению алгоритмического обеспечения для решения задач указанных подсистем.

Ключевые слова: нефтедобывающая скважина, электроцентробежный насос, многоуровневые системы управления, автоматическое регулирование, аварийное управление

Введение

В настоящее время до 70 % нефти добывается на базе установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Это обуславливает актуальность непрерывного повышения показателей их эффективности, таких как производительность, экономичность, время безотказной работы и др., которые в итоге формируют себестоимость добываемой нефти. Повышение указанной эффективности достигается как путем совершенствования эксплуатационных показателей элементов УЭЦН, так и путем создания эффективных автоматизированных систем управления (АСУ). Опыт испытаний АСУ УЭЦН различных производителей показал их значительный потенциал по повышению таких показателей, как время безотказной работы за счет автоматического предотвращения аварийных ситуа-

ций, производительность и экономичность за счет автоматического поддержания оптимальных режимов работы. В то же время испытания данных систем, проводимые ведущими нефтедобывающими предприятиями, показывают ряд недостатков, сдерживающих их массовое внедрение [1]. Одной из основных проблем, выявленных в процессе данных испытаний, является недостаточная эффективность алгоритмического обеспечения АСУ УЭЦН, приводящая в ряде случаев к недопустимым управленческим решениям. Решение данной проблемы связано с совершенствованием методологии синтеза алгоритмов управления, включая повышение эффективности применяемых математических моделей, а также применение достижений современной теории автоматического управления и искусственного интеллекта.

В данной статье приводится аналитический обзор актуальных задач автоматизации управления УЭЦН нефтедобывающих скважин и подходы к их решению.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01569.

УЭЦН как объект управления

Для определения УЭЦН как объекта управления необходимо выделить такие параметры, как управляемые параметры X , параметры управляющих U и возмущающих V воздействий. Для этого рассмотрим структуру и принцип действия современных УЭЦН.

УЭЦН представляет собой сложную много-связную систему, основными элементами которой являются: колонна насосно-компрессорных труб (НКТ), формирующая канал для движения добываемой жидкости из скважины в наземную систему сбора нефти (НСС) посредством устьевого оборудования (УО); погружной центробежный насос (ЦН), обеспечивающий напор и подачу жидкости в НКТ; погружной (асинхронный или вентильный) электродвигатель (ПЭД), обеспечивающий скорость и момент вращения ЦН; станция управления (СУ), обеспечивающая и управляющая электропитанием ПЭД с помощью управляемого частотного преобразователя; кабель питания (КП), обеспечивающий подачу электропитания от СУ в ПЭД; телеметрическая система (ТМС), обеспечивающая измерение и передачу в СУ значений параметров, характеризующих состояние погружных элементов УЭЦН (температуры, давления, вибрации, электрических токов и др.) (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Рассмотрим основные особенности работы УЭЦН, связанные с ее взаимодействием с нефтеносным пластом и скважиной (рис. 1). До начала процесса извлечения жидкости (смесь из нефти, воды, растворенного газа и др.) поступает в обсадную колонну (ОК) скважины из нефтеносного пласта вследствие разницы между пластовым давлением $P_{\text{пл}}$ и давлением $P_{\text{заб}}$ в забойной зоне скважины ($P_{\text{заб}} < P_{\text{пл}}$), образуя приток пластовой жидкости $Q_{\text{пр}}$. По мере заполнения ОК жидкостью происходит рост забойного давления $P_{\text{заб}}$, создаваемого столбом $L_{\text{ж}}$ данной жидкости: $P_{\text{заб}} = \rho g L_{\text{ж}}$, где ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения. После того как забойное давление достигает значения пластового ($P_{\text{заб}} = P_{\text{пл}}$), приток жидкости в скважину прекращается ($Q_{\text{пр}} = 0$), устанавливается статическая высота $L_{\text{ж}}$ столба жидкости и соответствующий уровень H (статический уровень) жидкости, равный расстоянию от устья скважины до поверхности жидкости: $H = L_{\text{скв}} - L_{\text{ж}}$,

где $L_{\text{скв}}$ — длина скважины. Для извлечения жидкости в скважину опускается УЭЦН на глубину, равную длине $L_{\text{НКТ}}$ колонны НКТ. После включения УЭЦН происходит отток Q жидкости из скважины в НКТ и далее в НСС. Отток вызывает понижение высоты столба жидкости $L_{\text{ж}}$, повышение уровня H , снижение забойного давления ниже пластового ($P_{\text{заб}} < P_{\text{пл}}$) и в результате возобновление притока $Q_{\text{пр}}$ жидкости в скважину из пласта. После того как приток сравнивается с добываемым потоком ($Q_{\text{пр}} = Q$), происходит стабилизация высоты $L_{\text{ж}}$ столба жидкости и уровня H (динамический уровень), а УЭЦН выходит на номинальный режим работы с дебитом Q .

Рассмотрим основные параметры, характеризующие УЭЦН:

1) множество параметров (A), определяющих свойства УЭЦН, включающее в себя:

- подмножество параметров (A_1), определяющих свойства элементов УЭЦН: ПЭД, ЦН, НКТ;
- подмножество параметров (A_2), определяющих свойства нефтеносного пласта: проницаемость, давление и др.;
- подмножество параметров (A_3), определяющих свойства добываемой жидкости: концентрации нефти, воды, газа; вязкость, температура и др.;

2) множество параметров (B), характеризующих процесс нефтедобычи на базе УЭЦН, включающее в себя:

- подмножество параметров (B_1), характеризующих процесс движения добываемой жидкости: дебит Q , динамический уровень H и др.;
- подмножество параметров (B_2), характеризующих режим работы ПЭД: потребляемая мощность, параметры электрических фазных напряжений и токов; температура; текущая наработка и др.;
- подмножество параметров (B_3), характеризующих режим работы ЦН: напор, подача, давление на входе и выходе, температура и др.

С точки зрения управления указанные параметры можно разделить на следующие группы:

- управляемые параметры: $X = (B_1, B_3)$;
- параметры управляющих воздействий: $U = B_2$;
- параметры возмущающих воздействий: $V = (A_1, A_2, A_3)$.

Анализ УЭЦН как объекта управления, включая математические модели, приведен в работах [4, 7, 8].

Цели, задачи и обобщенная структура АСУ УЭЦН

Целью АСУ УЭЦН является обеспечение множества $P_{\text{ОПТ}}$ проектных показателей эксплуатации УЭЦН, таких как проектный среднегодовой дебит нефти, проектный межремонтный период и др. Для достижения указанной цели необходимо решение в реальном времени следующих задач:

- обеспечение оптимальных параметров элементов УЭЦН (B_1);
- поддержание оптимальных параметров режима работы УЭЦН (B_2).

Данная цель может быть достигнута на основе двухуровневой структуры АСУ УЭЦН, включающей в себя:

- *планирующий уровень управления* — определение оптимальных параметров элементов УЭЦН ($B_{1,\text{ОПТ}}$) и параметров режима работы УЭЦН ($B_{2,\text{ОПТ}}$);
- *оперативный уровень управления* — реализация оптимальных параметров элементов ($B_1 = B_{1,\text{ОПТ}}$) и параметров режима работы УЭЦН ($B_2 = B_{2,\text{ОПТ}}$).

Рассмотрим подход к реализации двухуровневой структуры АСУ УЭЦН (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Планирующий уровень управления реализуется на базе кустовых информационно-вычислительных центров, охватывающих отдельные группы скважин месторождения, взаимодействует с оперативным уровнем управления, а также с информационно-вычислительным центром месторождения, реализующим координирующее управление месторождением в целом.

Далее рассмотрены подходы к построению алгоритмического обеспечения указанных уровней управления.

Планирующий уровень управления УЭЦН

Планирующий уровень управления реализуется на базе кустовых информационно-вычислительных центров, охватывающих отдельные группы скважин месторождения.

Задачей данного уровня управления является выработка управленческих решений, включающих в себя:

1) оптимальные значения параметров $Y_{\text{ОПТ}}$ элементов УЭЦН и мероприятия $M_{\text{ОПТ}}$ по их обеспечению (замена элементов, изменение глубины погружения, геолого-технологические мероприятия и др.);

2) оптимальные параметры $X_{\text{ОПТ}}$ режимов работы УЭЦН (уставки) отдельных скважин. Далее указанные решения передаются на оперативный уровень управления для реализации.

Решения принимаются на основе следующей входной информации:

1) требуемые (оптимальные) значения показателей $P_{\text{ОПТ}}$ нефтедобычи скважин группы, получаемые от информационно-управляющего центра месторождения; данные параметры вырабатываются в целях координирования работы всех групп скважин месторождения;

2) параметры G , характеризующие текущую геологическую обстановку и свойства добываемой жидкости в области питания группы скважин от геологических служб месторождения;

3) параметры X режимов работы УЭЦН от отдельных скважин группы.

Автоматизация данного уровня предполагает применение систем поддержки принятия управленческих решений, решающих следующие основные задачи:

1) сбор, предварительная обработка, классификация больших массивов полученной оперативной информации о различных аспектах процесса нефтедобычи;

2) прогнозирование развития процессов на скважинах группы;

3) выработка рекомендаций по принятию решений об управлении УЭЦН скважин группы, обеспечивающих требуемые показатели нефтедобычи.

Окончательные решения ($Y_{\text{ОПТ}}$, $X_{\text{ОПТ}}$) принимаются технологом (рис. 3).

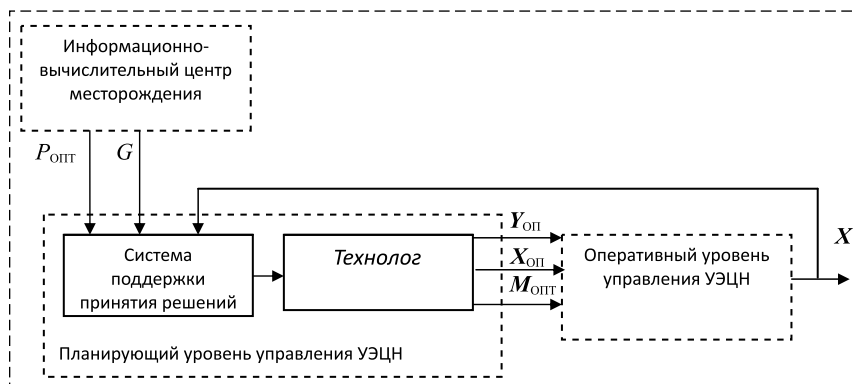


Рис. 3. Структура системы планирующего уровня управления УЭЦН
Fig. 3. The structure of the planning level of the ESP control system

Подходы к построению математического и алгоритмического обеспечения указанных систем поддержки принятия решений на основе методов теории искусственного интеллекта рассмотрены в работах [5, 6]. Современные подходы к построению алгоритмов координированного управления группами скважин месторождения рассмотрены в работах [2, 3].

Оперативный уровень управления УЭЦН

Оперативный уровень является нижним уровнем управления УЭЦН, на котором непосредственно выполняются управленческие решения ($Y_{\text{ОПТ}}$, $X_{\text{ОПТ}}$), выработанные на планирующем уровне. Задачи оперативного уровня можно разделить на следующие виды:

1) обеспечение оптимальных параметров $Y_{\text{ОПТ}}$ элементов УЭЦН — замена и ремонт элементов, геолого-технологические мероприятия; данная задача выполняется периодически со сравнительно большими интервалами, представляет собой множество сложных технологических операций (спуск, подъем, демонтаж и т. д.) и в целом выполняется вручную;

2) обеспечение оптимальных параметров $X_{\text{ОПТ}}$ режима работы УЭЦН — поддержание дебита скважины, предотвращение аварийных ситуаций и др.; решение данной задачи требует комплексной автоматизации.

Рассмотрим подходы к автоматизации задачи обеспечения оптимального режима работы УЭЦН. Для этого целесообразно разделить данную задачу управления на следующие составляющие: аварийное управление; управление выводом на режим работы; регулирование параметров режима работы. Каждая из указанных составляющих задачи управления требует своего аппаратного алгоритмического обеспечения, которые рассмотрены ниже.

Аварийное управление УЭЦН

Цель аварийного управления УЭЦН — предотвращение отказов его элементов (ПЭД, ЦН) путем их защиты от действия различных негативных факторов. Задачи аварийного управления можно разделить на следующие группы по видам наиболее значимых негативных факторов:

1) защита от негативных факторов электропитания УЭЦН, таких как отклонение амплитуд фазных напряжений от номинальных значений; дисбаланс амплитуд фазных напряжений и др.;

2) защита от негативных факторов добываемой жидкости, таких как повышенное содержание механических примесей; повышенное содержание растворенного газа; повышенная температура добываемой жидкости; пониженное пластовое давление и др.;

3) защита от негативных технологических факторов, таких как снижение сопротивления изоляции кабеля питания; слив жидкости из НКТ; дисбаланс обмоток полюсов статора и др.

Аппаратное обеспечение аварийного управления включает в себя измерительные устройства, контроллер и исполнительные устройства. К измеряемым критическим параметрам относятся: параметры фаз питающего напряжения; параметры потребляемых фазных токов; температура ПЭД; давление на входе ПЭД и др. Измерение выполняется с помощью наземных измерительных устройств и погружных телеметрических систем, таких как термоманометрические системы (ТМС). Функции контроллера и исполнительного устройства здесь выполняют элементы в составе станций управления УЭЦН.

Алгоритмическое обеспечение аварийного управления представляет собой множество решающих правил, выполняющих допусковый контроль критических параметров УЭЦН и формирование сигналов на изменение режима работы УЭЦН. Алгоритмы должны также предусматривать возможность автоматического выхода из аварийного режима при прекращении действия негативных факторов. Взаимодействие с планирующим уровнем управления здесь выполняется путем получения от него значений допусков и критериев выхода из аварийного режима (уставок). Структура подсистемы аварийного управления показана на рис. 4, где X_0 — множество уставок, X_1 — мно-

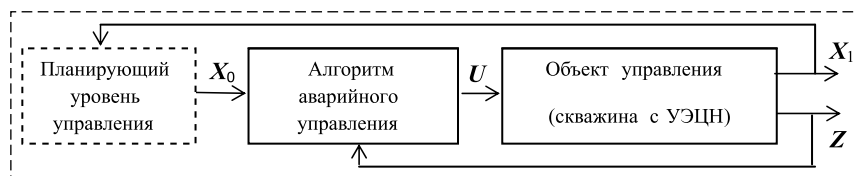


Рис. 4. Структура подсистемы аварийного управления УЭЦН
Fig. 4. The structure of the subsystem for ESP emergency control

жество измеряемых критических параметров УЭЦН, U — множество управляющих воздействий, Z — множество контролируемых параметров, характеризующих негативные факторы.

Регулирование параметров режима работы УЭЦН

Одной из наиболее актуальных задач регулирования параметров режима работы УЭЦН является поддержание максимально допустимого дебита Q скважин.

Аппаратное обеспечение регулирующего управления включает в себя измерительные устройства, контроллер и исполнительные устройства. Непосредственное оперативное измерение дебита на скважине сегодня аппаратно не реализуется, вместо этого используются косвенные оценки с помощью датчиков динамического уровня H жидкости или давления $P_{Вх}$ жидкости на входе насоса. Функции контроллера и исполнительного устройства здесь выполняют элементы (ПЛК, ПЧ) в составе штатных станций управления УЭЦН. Управляющим воздействием U здесь являются параметры электрического питающего напряжения ПЭД (действующее значение u , частота f).

Алгоритмическое обеспечение регулирующего управления представляет собой закон выработки управляющего воздействия U , обеспечивающего поддержание дебита Q скважины на максимально допустимом уровне $Q_{кр}$ в условиях действия возмущающих воздействий V . Подход к построению данного алгоритма во многом определяется критерием, характеризующим достижение критического значения дебита $Q_{кр}$. Данный критерий определяется факторами, ограничивающими дебит скважины. К наиболее значимым факторам здесь относятся выделение растворенного в жидкости газа на приеме насоса, приводящее к срыву его подачи. Причиной выделения газа является снижение давления $P_{Вх}$ жидкости на входе насоса ниже критического $P_{Нас}$ (давление насыщения), которое создается столбом жидкости высотой $L_{Вх}$, расположенным в скважине над насосом: $P_{Вх} = \rho g L_{Вх}$. Дебит Q скважины связан с давлением $P_{Вх}$ посредством высоты $L_{Вх}$ столба жидкости. Чем больше дебит Q , тем меньше высота столба

жидкости $L_{Вх}$, а следовательно, давление $P_{Вх}$. Таким образом, дебит Q ограничен некоторым критическим значением $Q_{кр}$, при котором давление на входе $P_{Вх}$ становится равным допустимому уровню — давлению насыщения $P_{Нас}$.

Рассмотрим алгоритм поддержания максимально допустимого дебита скважины с учетом указанного фактора. Данный алгоритм может быть построен как алгоритм автоматической стабилизации давления $P_{Вх}$ на входе насоса на уровне давления насыщения $P_{Нас}$ посредством изменения дебита скважины. Основным возмущающим воздействием здесь является колебание пластового давления $P_{Пл}$, приводящее к колебаниям высоты $L_{Вх}$ столба жидкости над насосом, а следовательно, и давления $P_{Вх}$. При этом стабилизация происходит при различных значениях дебита Q . К возмущающим факторам можно также отнести колебания свойств V_2 добываемой жидкости, таких как газосодержание, водосодержание, температура и др., приводящие к колебаниям критического давления насыщения $P_{Нас}$, что требует коррекции значения $P_{Нас}$ как уставки. Данная задача может выполняться на планирующем уровне управления по оперативным данным о добываемой жидкости. Для стабилизации в качестве законов регулирования могут быть применены такие непрерывные законы, как ПИД регуляторы, нечеткие регуляторы и др. Структура подсистемы непрерывного регулирования дебита показана на рис. 5.

Еще одним фактором, ограничивающим максимально допустимый дебит скважины, является КПД ЦН. Так, при низких пластовых давлениях $P_{Пл}$ возможны ситуации, когда критическое значение дебита снижается до величин, обеспечение которых требует работы ЦН с неприемлемо низким КПД. В данном случае применение вышеприведенного непрерывного алгоритма регулирования становится нецелесообразным. Одним из подходов к решению задачи в данном случае является применение

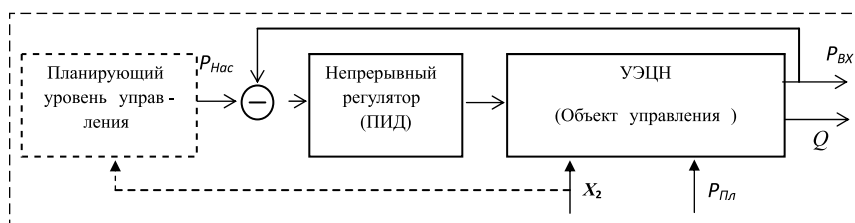


Рис. 5. Структура подсистемы непрерывного регулирования дебита УЭЦН
Fig. 5. The structure of the subsystem for ESP production rate continuous control

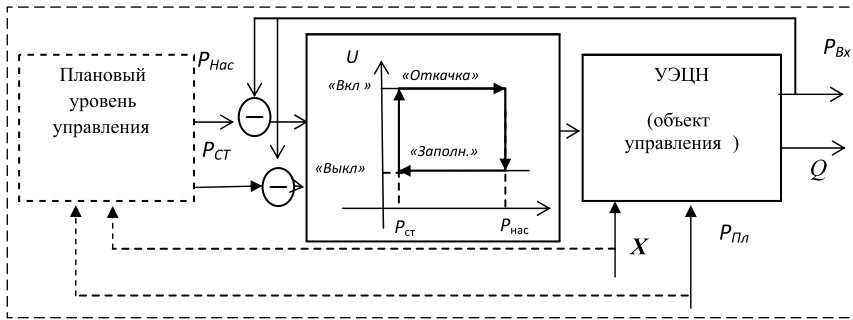


Рис. 6. Структура подсистемы прерывного регулирования дебита УЭЦН
 Fig. 6. The structure of the subsystem for discontinuous control of ESP production rate

двухпозиционных законов регулирования. Рассмотрим один из данных законов, при котором УЭЦН периодически переходит в один из следующих режимов работы (рис. 6):

- 1) режим заполнения скважины — УЭЦН выключен, жидкость из пласта поступает в скважину до достижения статического уровня $H_{ст}$;
- 2) режим откачки жидкости — УЭЦН включен в номинальный режим (КПД равен номинальному значению), жидкость откачивается из скважин до достижения критического динамического уровня $H_{кр}$.

Подходы к построению математического и алгоритмического обеспечения задач оперативного уровня управления УЭЦН представлены в работах [6—8, 10].

Управление выводом на режим работы УЭЦН

Задача вывода на режим работы УЭЦН решается в следующих случаях: первый пуск скважины; пуск после операций по изменению параметров или замене и ремонту ее элементов, связанных с изъятием УЭЦН из скважины. Особенности данной задачи являются следующие: нарушение процесса охлаждения

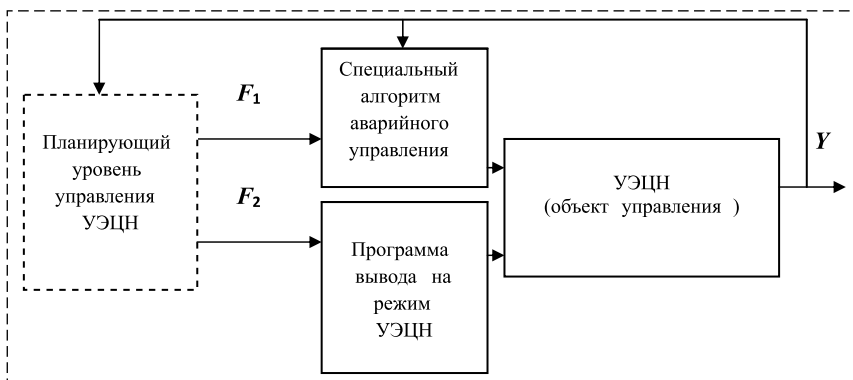


Рис. 7. Структура алгоритма управления выводом УЭЦН на режим работы
 Fig. 7. The control algorithm structure of ESP output to the operation mode

ПЭД; возможные неисправности и ошибки в настройках оборудования скважины, не выявленные при подготовке к пуску; возможные ошибки в предварительных расчетах параметров режима.

Рассмотрим причину нарушения процесса охлаждения ПЭД. В номинальном режиме охлаждение ПЭД происходит посредством обтекающей его жидкости, которая движется от забоя к ЦН

(рис. 7). За период остановки добычи в колонне над ЦН накапливается статический уровень жидкости, уровень которого значительно превосходит номинальный. После запуска УЭЦН происходит постепенное снижение данного уровня жидкости от статического до номинального динамического. В течение данного процесса в ЦН поступает жидкость в основном за счет снижения ее уровня над насосом, т. е. сверху вниз. Это приводит к тому, что существенно падает поток, обтекающий и охлаждающий ПЭД, который расположен ниже ЦН.

Одним из подходов к построению алгоритма защиты от нарушения процесса охлаждения ПЭД является применение программы, состоящей из повторяющихся циклов управления, включающих в себя следующие операции:

- 1) временной интервал пуска УЭЦН: плавный вывод на номинальный режим с ограничением пусковых токов ПЭД;
- 2) временной интервал работы УЭЦН в номинальном режиме;
- 3) временной интервал остановки УЭЦН: плавная безопасная остановка;
- 4) временной интервал охлаждения ПЭД.

Ошибки в расчетах и настройках, допущенные при подготовке к выводу скважины на режим,

могут привести к невозможности выполнения задачи и отказу оборудования. Например, ошибки чередования фаз питающего напряжения ПЭД могут привести к вращению УЭЦН в противоположную сторону и, следовательно, отсутствию подачи. Таким образом, задачу вывода на режим работы УЭЦН можно рассматривать как специальную задачу аварийного управления. В целях защиты от ошибок в настройках оборудования скважины в алгоритм вво-

дится контроль дополнительных параметров, в частности, контроль скорости изменения динамического уровня жидкости в скважине. При его несоответствии расчетным значениям выполняется остановка УЭЦН, поиск и устранение ошибок или неисправностей.

Общая структура взаимодействия уровней управления УЭЦН

На основе вышеприведенных структур подсистем можно представить общую структуру системы управления УЭЦН скважины (рис. 8). На рис. 8 указаны следующие параметры: F_0 — параметры, определяющие текущие алгоритмы управления; $F_1, F_2, F_3, F_4, U_1, U_2, U_3, U_4$ — параметры, определяющие уставки и управляющие воздействия соответственно аварийного управления, управления выводом на режим УЭЦН, непрерывного и прерывного регулирования; X — измеряемые параметры элементов УЭЦН; Y — измеряемые параметры добываемой жидкости.

Заключение

Решение задачи автоматизации управления УЭЦН нефтедобывающей скважины требует создания сложных многоуровневых систем принятия и реализации управленческих решений. Верхние (планирующие) уровни управления требуют разработки систем поддержки принятия решений, выполняющих в реальном времени сбор и анализ больших объемов информации о различных аспектах процесса работы скважины с УЭЦН. Актуальными задачами этого уровня являются разработка моделей идентификации и прогнозирования процессов нефтедобычи, а также алгоритмов поиска управленческих решений, направленных на оптимизацию данных процессов. Нижние (оперативные) уровни управления требуют разработки систем аварийного и регулирующего управления, реализующих решения, принятые на верхних уровнях. Актуальной задачей данного уровня управления является разработка динамических моделей процессов работы УЭЦН, обеспечивающих синтез оп-

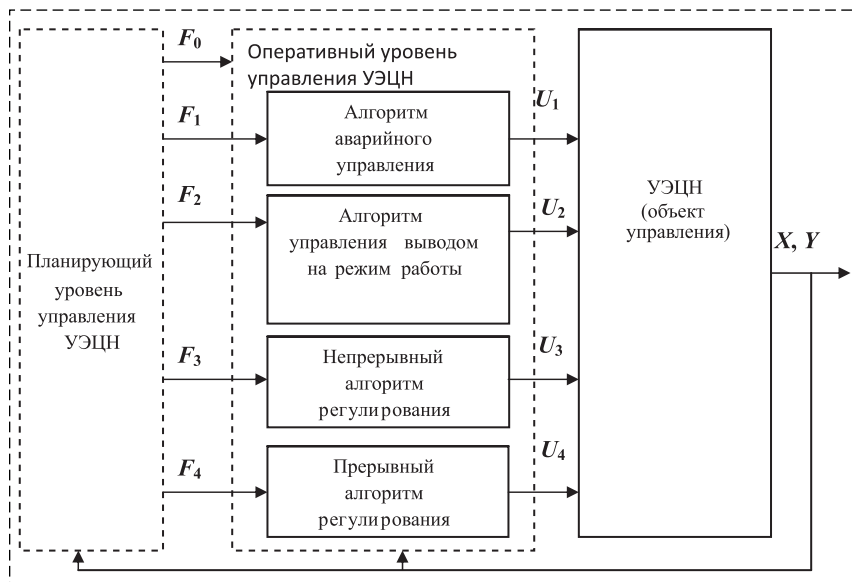


Рис. 8. Структура алгоритмического обеспечения АСУ УЭЦН
Fig. 8. The algorithmic structure of the ESP automated control system

тимальных алгоритмов реализации решений верхнего уровня управления, таких как стабилизация, ввод-вывод из режима, аварийное управление и др.

Список литературы

1. Худяков Д., Маркелов Д. Интеллектуальные станции управления УЭЦН // Нефтегазовая Вертикаль. 2011. № 11. С. 64—68.
2. Тагирова К. Ф. Решение актуальных задач автоматизации добычи нефти на основе иерархической системы моделей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 9. С. 37—40.
3. Тагирова К. Ф. Повышение эффективности добычи нефти на основе координации управления технологическими процессами и объектами // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 10, № 2 (27). С. 48—52.
4. Ильясов Б. Г., Тагирова К. Ф., Комелин А. В. Самоорганизующаяся нейросетевая система диагностики установок электроцентробежного насоса // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2005. № 10. С. 20—23.
5. Ильясов Б. Г., Тагирова К. Ф., Комелин А. В. УЭЦН как сложный динамический объект управления // Технологии ТЭК. 2005. № 5. С. 94—99.
6. Нугаев И. Ф., Васильев В. И. Управление процессами скважинной добычи нефти на основе каскадных алгоритмов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 5. С. 321—326.
7. Нугаев И. Ф., Искужин Р. В. Динамическая модель нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН как объекта управления // Нефтегазовое дело. 2012. № 5.
8. Нугаев И. Ф., Искужин Р. В. Комплекс математических моделей для синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах // Вестник УГАТУ. Сер. "Управление, вычислительная техника и информатика". 2012. Т.16, № 8(53). С. 36—44.
9. Нугаев И. Ф., Искужин Р. В. Анализ и синтез алгоритмов управления нефтедобывающей скважиной на базе

электрического центробежного насоса // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 8, № 1. С. 18–20.

10. **Konopczynski M. R., Moore W. R., Hailstone J. J.** ESPs and Intelligent Completions // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, 2002.

11. **Gamboa J. A., Prado M. G.** Review on ESP Surging Correlations and Models // SPE Production and Operations Symposium. Oklahoma City, USA, 2011.

12. **Shimokata N., Yamada Y.** Troubles, Problems and Improvement of ESP // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi, UAE, 2010.

Actual Tasks of Oil-Well Electric Submersible Pump Control Automation

K. F. Tagirova, tagirovakf@yandex.ru, **I. F. Nugaeв**, inugaev@yandex.ru,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation

Corresponding author: **Tagirova Klara F.**, Ph. D., Professor,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: tagirovakf@yandex.ru

Accepted on October 10, 2019

Abstract

The article is devoted to the analysis of actual problems of automation of control of the installations of electric centrifugal pumps (ESPs) of oil producing wells and modern approaches to their solution. The solution of the problem requires the creation of complex multi-level systems for the adoption and implementation of control decisions. The top (planning) level of control requires the development of decision support systems that perform real-time collection and analysis of large amounts of information about the various work processes with ESPs. Actual tasks of this level are the development of models for identification and forecasting of oil production processes, as well as algorithms for finding control solutions aimed at optimizing these processes. Lower (operational) levels of management require the development of emergency and regulatory control systems that implement decisions taken at the upper levels. The actual tasks of this level of management are the development of dynamic models of the ESP process that provide the synthesis of optimal algorithms for implementing top-level management solutions, such as stabilization, I/O, emergency control. The main goals, tasks of these systems and approaches to the solution are considered. The analysis of ESP as a complex multiply connected control object is given. Controllable parameters, parameters of controlling and disturbing influences are distinguished. The generalized multilevel structure of the ESP control system and approaches to the construction of subsystems solving management tasks at various levels are considered. The approach to the construction of the system of the upper — planning level of the ESP control, the principles of its interaction with higher and subordinate systems is considered. The approach to the construction of the subsystem of the lower — operational level of the ESP control is considered. The tasks of this level of control are considered, including such as emergency control, regulation of the mode parameters, output to the operating mode. The classification of groups of emergency control tasks on protection from the most significant types of negative factors and approaches to their solution is given. The approach to the solution of the problem of ensuring the maximum oil production, as a problem of stabilizing the critical pressure at the pump inlet, is considered. Continuous and positional variants of algorithms for solving this problem are presented.

Keywords: automated control systems, oil producing wells, electric submersible pump, multi-level control system, emergency control, stabilizing control, continuous and positional control algorithms

For citation:

Tagirova K. F., Nugaeв I. F. Actual Tasks of Oil-Well Electric Submersible Pump Control Automation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 102–109.

DOI: 10.17587/mau.21.102-109

References

1. **Khudyakov D., Markelov D.** Intelligent control stations of ESP, *Neftegazovaya Vertikal*, 2011, no. 11, pp. 64–68 (in Russian).
2. **Tagirova K. F.** Solution of actual problems of automation of oil production on the basis of a hierarchical system of models, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2007, no. 9, pp. 37–40 (in Russian).
3. **Tagirova K. F.** Increasing the efficiency of oil production on the basis of coordination of management of technological processes and facilities, *Vestnik UGATU*, 2007, vol. 10, no. 2 (27), pp. 48–52 (in Russian).
4. **Ilyasov B. G., Tagirova K. F., Komelin A. V.** Self-organizing neural network diagnosis system for the installation of an electric centrifugal pump, *Avtomatizatsiya. telemekhanizatsiya i svyaz v nefteyanoy promyshlennosti*, 2005, no. 10, pp. 20–23 (in Russian).

5. **Ilyasov B. G., Tagirova K. F., Komelin A. V.** ESP as a complex dynamic control object, *Tekhnologii TEK*, 2005, no. 5, pp. 94–99 (in Russian).
6. **Nugaeв I. F., Vasilyev V. I.** Control of oil-well production on the basis of cascade algorithms, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, no. 5, pp. 321–326 (in Russian).
7. **Nugaeв I. F., Iskozhin R. V.** Dynamic model of oil production on the basis of ESP as control object, *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Neftegazovoye delo"*, 2012, no. 5 (in Russian).
8. **Nugaeв I. F., Iskozhin R. V.** A complex of mathematical models for the synthesis of process control algorithms in oil-producing wells, *Vestnik UGATU*, Ufa, 2012, vol. 16, no. 8 (53), pp. 36–44 (in Russian).
9. **Nugaeв I. F., Iskozhin R. V.** Analysis and synthesis of control algorithms for an oil well on the basis of an electric centrifugal pump, *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 18–20 (in Russian).
10. **Konopczynski M. R., Moore W. R., Hailstone J. J.** ESPs and Intelligent Completions, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, Texas, 2002.
11. **Gamboa J. A., Prado M. G.** Review on ESP Surging Correlations and Models, *SPE Production and Operations Symposium*, Oklahoma City, USA, 2011.
12. **Shimokata N., Yamada Y.** Troubles Problems and Improvement of ESP, *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, UAE, 2010.

В. М. Иванов, канд. техн. наук, доц., v.ivanov@ulstu.ru,
Ульяновский государственный технический университет

Имитационная модель системы стабилизации скорости резания для металлорежущих станков с ЧПУ

Разработана имитационная модель стабилизации скорости резания для токарных станков с числовым программным управлением. Режим стабилизации скорости резания позволяет решать ряд технологических задач, к числу которых относятся повышение производительности обработки и качества поверхности детали, увеличение стойкости режущего инструмента. Доступ к функциям базового программного обеспечения систем ЧПУ ограничен. С учетом этого в данной работе рассматриваются функциональные и алгоритмические особенности систем стабилизации силовых параметров как основа дальнейшей разработки интеллектуального алгоритмического и программного обеспечения. Существующие рекомендации, определяющие режим резания, основаны на эмпирических зависимостях, использование которых для непосредственного применения в алгоритмах автоматического управления затруднено, так как данные зависимости определяют прогнозируемые, а не текущие параметры. В качестве базовой структуры процесса формообразования детали принята нестационарная модель, основные параметры которой определены трехмерной кинематикой универсального станка. Обобщенный подход к системам силовых параметров и синтез регуляторов основных контуров позволили выявить наиболее простой вариант структур, основанный на использовании регуляторов с параметрической обратной связью. Функциональная модель содержит основные компоненты системы ЧПУ: интерполятор, сервоприводы подачи и главного движения, а также дополнительные модули цикла и анализа. Рассмотрены высокоскоростная обработка торцевых поверхностей и условия реализации цикловых задач управления. Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность функциональных алгоритмов и возможность их использования в интеллектуальных системах ЧПУ.

Ключевые слова: скорость резания, формообразование, электропривод, интерполятор

Введение

За последние десятилетия произошли кардинальные изменения в области станкостроения, связанные как с разработкой многофункциональных станков, так и с разработкой нового поколения систем числового программного управления [1, 2]. Переход на системы PCNC (Personal Computer Numerical Control) сопровождался не только переходом на принципиально новое программное обеспечение, основанное на операционной системе WINDOWS NT, но и существенным расширением функций базового программного обеспечения ЧПУ [3, 4].

Лидирующие позиции в области современных систем с ЧПУ для металлообрабатывающего оборудования в настоящее время занимают ряд зарубежных фирм, к числу которых относятся FANUC, Siemens и HEIDENHEIN. Передовые технологические решения в области аппаратного и программного обеспечения систем с ЧПУ обеспечивают эффективность металлообработки. К числу таких решений относится пакет

"Dynamic Efficiency" фирмы HEIDENHAIN, который содержит функции управления AFC (Adaptive Feed Control — адаптивное управление подачей), обеспечивающие оптимальную подачу в процессе обработки. Для повышения качества обработки поверхности в системах с ЧПУ фирмы Siemens введены новые функции контроля состояния режущего инструмента, которые позволяют отказаться от финишной обработки деталей и тем самым повысить производительность. Алгоритм предварительного просмотра кадров Look-ahead позволяет обрабатывать контур с максимально возможной подачей и заблаговременно снижать скорость в критических ситуациях.

К расширенным функциям ЧПУ можно отнести функции, с помощью которых задают скорость резания и подачу на оборот привода главного движения станка. С одной стороны, это программный переход к кинематике универсального станка, а с другой — дополнительные возможности по обработке детали за счет оптимизации режимов резания. Режим ста-

билизации скорости резания (ССР) позволяет решать ряд технологических задач [5–7]. К их числу относится повышение производительности обработки и качества поверхности детали, увеличение стойкости режущего инструмента. Необходимо отметить, что доступ к функциям базового программного обеспечения ЧПУ ограничен, и работа с ними осуществляется, как правило, только в режиме пользователя. С учетом этого в работе рассматриваются структурные и функциональные особенности систем стабилизации силовых параметров резания как основы для дальнейшей разработки алгоритмического и программного обеспечения функций ЧПУ для станков токарной группы.

Кинематика процесса формообразования детали

Условия протекания процесса резания определяются как кинематической схемой резания, так и условиями снятия срезаемого слоя, обусловленными упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, трением, тепловыми явлениями, химическими, электрическими и другими факторами. Существующие материалы, содержащие рекомендации по режимам резания [8, 9], основаны в большинстве случаев на эмпирических зависимостях, использование которых для непосредственного применения в алгоритмах автоматического управления процессом резания затруднено, так как данные зависимости определяют прогнозируемые, а не текущие параметры. Учитывая это, в качестве величин, характеризующих процесс резания, используют силы резания, моменты нагрузки, токи и мощность на валу двигателя. При этом возникает задача определения взаимосвязи данных величин, так как все они характеризуют параметры процесса резания.

Рассмотрим структурную схему процесса обработки резанием как совокупности одновременно совершающихся взаимосвязанных процессов, среди которых в первую очередь выделим механизм стружкообразования и силовые параметры резания.

В процессе обработки формообразование поверхности детали может быть записано следующим образом:

- для продольного точения

$$\Phi_{xy}(\tau) = a_y(V_x\tau + \Delta x);$$

- для поперечного точения

$$\Phi_{yx}(\tau) = a_x(V_y\tau + \Delta y),$$

где $a_x = a_x^* + \Delta a_x$, $a_y = a_y^* + \Delta a_y$ — величины, характеризующие припуск на сьем металла по координатам x , y ; $a_x^* = V_x\tau$, $a_y^* = V_y\tau$ — подача за время τ одного оборота шпинделя; V_x , V_y — скорости подач инструмента; Δa_x , Δa_y — неравномерность припуска обработки детали.

При однокоординатной обработке Δa_x , Δa_y определяют соответственно глубину резания по соответствующей координате.

Текущее значение силы резания согласно работе [10] равно

$$F_i(\tau) = \Phi(\tau)H_w(\tau)C_{F_i}(\tau),$$

где H_w — твердость материала заготовки; C_{F_i} — коэффициент, характеризующий геометрические параметры режущего инструмента по координатам $i = x, y, z$ и неучтенные условия обработки.

Упрощенная структурная схема процесса формообразования детали приведена на рис. 1. Предполагается, что резец характеризуется коэффициентами, обусловленными геометрией резания и свойствами материала заготовки, механические передачи станка — передаточными числами механизмов, а путевой контур по координатам x , y описывается передаточной функцией

$$W_{x,y}(p) = \frac{X, Y}{V_{x,y}} = \frac{1}{p}.$$

Основное различие между моментами нагрузки на валах двигателей шпинделя ($D_{ш}$) и подач суппорта ($D_{пх}$, $D_{пy}$) станка связано с радиусом обработки детали R . При постоянных условиях резания ($F = \text{const}$, $V_{x,y} = \text{const}$) основным режимом для приводов подач является режим постоянства момента, а для главного привода — постоянства мощности.

Статические моменты на валу двигателей подач определяются через коэффициенты приведения

$$M_{x,y} = F_{x,y}\rho_{x,y},$$

где $\rho_{x,y} = V_{x,y}/\omega_{x,y}$ — радиусы приведения по соответствующей координате.

Основной составляющей силы резания является тангенциальная составляющая F_z , которая определяет момент нагрузки привода главного движения. Рассмотрим процесс, вы-

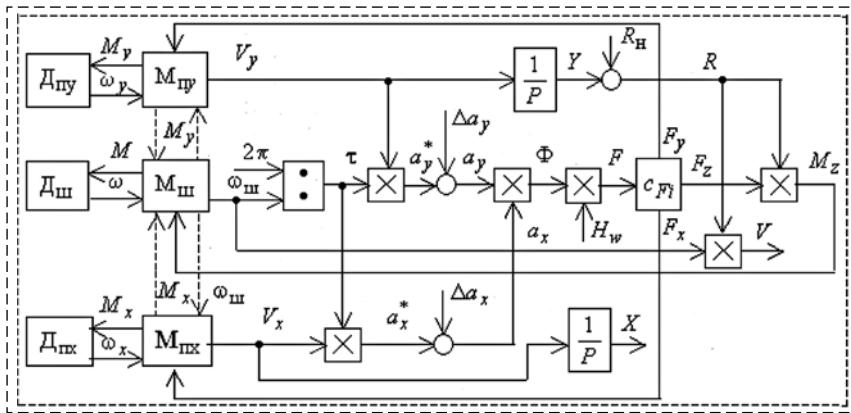


Рис. 1. Структурная схема процесса формообразования детали
Fig. 1. Block diagram of the process of forming parts

делив при этом величины, влияющие на стабилизацию основного параметра, в качестве которого примем мощность резания

$$N = M_{ш} \omega_{ш} = F_z R \omega_{ш} = F_z V,$$

где $M_{ш}$ — момент нагрузки на валу шпинделя

Из рассмотрения структуры (рис. 1) видно, что каждая из промежуточных величин является функцией параметров, значения которых в наиболее общем случае имеют случайное распределение во времени. Каждый из параметров входит в выходную величину в виде множителя, и поэтому согласно свойствам множительного звена его состояние можно оценить переменным во времени коэффициентом передачи $k_i(t)$, а связь входной g и выходной y величин записать следующим образом:

$$y(p, t) = g(p) k(t),$$

где $k(t) = \prod_{i=1}^n k_i(t)$ — обобщенный коэффициент передачи является функцией изменения параметров μ_i во времени.

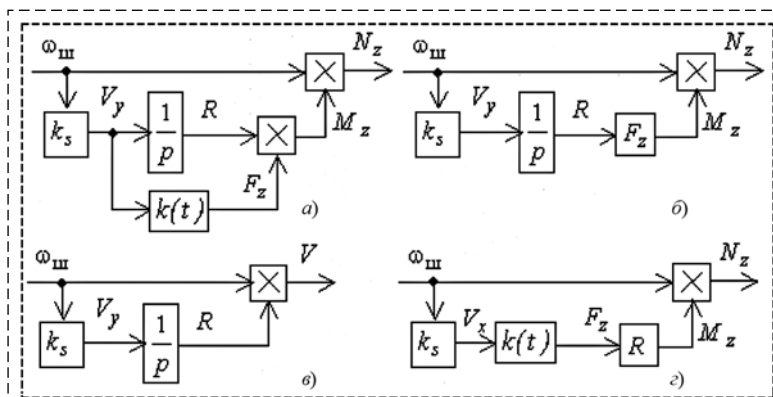


Рис. 2. Структура процесса резания относительно мощности резания
Fig. 2. The structure of the cutting process regarding cutting power

Выделим процесс резания (рис. 2, а), считая, что механизмы подачи и шпинделя связаны через коэффициент k_s , характеризующий подачу на оборот шпинделя. Структуры процесса резания относительно мощности резания (рис. 2, б) и скорости резания (рис. 2, в) при поперечном точении тождественны. Связь между переменными R и M_z осуществляется через значение F_z и, следовательно, система стабилизации скорости резания при соблюдении условия $F_z = \text{const}$ может быть реализована по силовому параметру.

Явная аналогия выходных координат систем прослеживается и при продольном точении. Для случая взаимосвязанного регулирования частоты вращения шпинделя и подачи суппорта процесс резания относительно N_z представлен на рис. 2, г. Координата $\omega_{ш}$ входит в величину, характеризующую мощность резания N_z относительно скорости подачи V_x , дважды и при этом взаимно компенсируется. Это согласуется с результатами работы [10], в которой экспериментально установлено, что коэффициент передачи по возмущению не зависит от частоты вращения шпинделя, а сдвиг фазы между глубиной резания и силами резания при всех режимах равен нулю. Следовательно, в первом приближении представление процесса резания в виде безынерционного звена согласно структуре (см. рис. 1) является правомерным.

Параметрические структуры стабилизации силовых параметров

Основные особенности систем стабилизации силовых параметров (СССП) заключаются в параметрическом законе их функционирования [11]. Рассмотрим обобщенную систему (рис. 3, а), которая содержит регулятор силового параметра $W_p(p)$, электропривод с передаточной функцией $W_1(p)$, цепь формирования силового параметра u , представленную нестационарным звеном $W_2(p, t)$, и множительное звено $F(x, y)$ формирования основной обратной связи по силовому параметру.

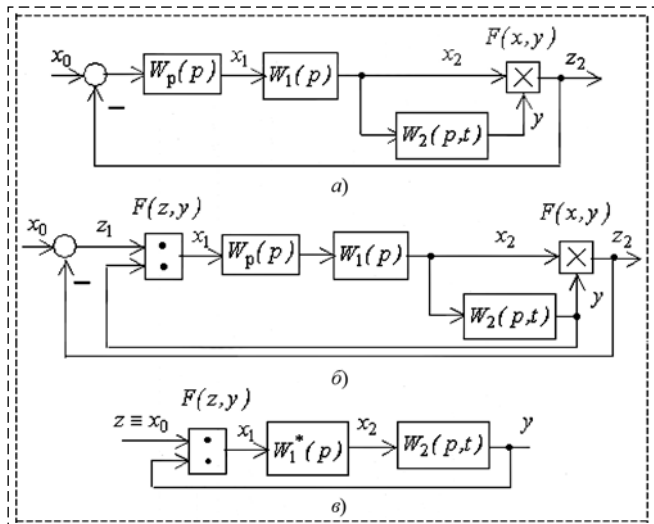


Рис. 3. Параметрические системы стабилизации силовых параметров

Fig. 3. Parametric systems of stabilizing power parameters

Коэффициент передачи множительного звена может изменяться в десятки и сотни раз, что является основной причиной неустойчивого поведения системы регулирования.

Компенсация влияния множительного звена на устойчивость системы показана на структурных схемах (рис. 3, б, в), где функциональные преобразователи $F(x, y)$, $F(z, y)$ представляют собой множительные и делительные устройства. При синтезе их можно рассматривать как взаимообратные нестационарные звенья $k(t)$ и $1/k(t)$. С учетом этого в состав регулятора введено параметрическое звено $F(z, y)$ (рис. 3, б). При этом система с дополнительным параметрическим регулятором $F(z, y)$ (рис. 3, б) эквивалентна системе с параметрической обратной связью (рис. 3, в), где звено замыкания обратной связью является параметрическим, а внутренний контур описывается передаточной функцией

$$W_1^*(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_p(p)W_1(p)}$$

В зависимости от выбора основной обратной связи можно получить ряд структур стабилизации силовых параметров. Предпочтительный вариант подсистемы для ЧПУ рассмотрен в работе [12] и основан на непосредственном измерении усилия резания.

Система стабилизации скорости резания

При обработке сложных поверхностей работа со сверхвысокими скоростями фактически

возможна лишь с соблюдением режима стабилизации скорости резания (ССР), так как из-за возможного отклонения в зону критических скоростей может произойти выход из строя режущего инструмента. В зависимости от целей управления, например при силовом резании, скорости подач могут варьироваться в функции параметров резания (усилий резания, токов, моментов, мощности). Если требуется получить заданную шероховатость, то на скорости подач необходимо наложить ограничения, позволяющие обеспечить поверхность заданного класса, или связать их со скоростями вращения шпинделя жестко. На рис. 4 показана модель системы ССР на токарных станках с ЧПУ. Стабилизация скорости резания осуществляется путем формирования частоты вращения электропривода шпинделя (ЭПШ) в соответствии с параметрической зависимостью $\omega = V/R$, где V — скорость резания, R — текущий радиус обработки относительно центра. Начало отсчета движения инструмента определяется при выходе суппорта на базовую точку. Этой точке соответствует начальный радиус R_0 относительно центра заготовки. При этом текущий радиус обработки определяется как $R = R_0 + \sum_{i=1}^n Y_i$, где Y_i — перемещение по поперечной координате суппорта, обрабатываемое на i -м кадре управляющей программы. Взаимосвязанное движение по координатам суппорта x, y осуществляется в функции текущей частоты вращения ω шпинделя. Это осуществляется путем пересчета скоростей подач $V_x^* = k_{sx} \omega$, $V_y^* = k_{sy} \omega$, где k_{sx}, k_{sy} — приведенные коэффициенты, характеризующие подачу на оборот шпинделя. При этом в отличие от традиционных алгоритмов интерполяции,

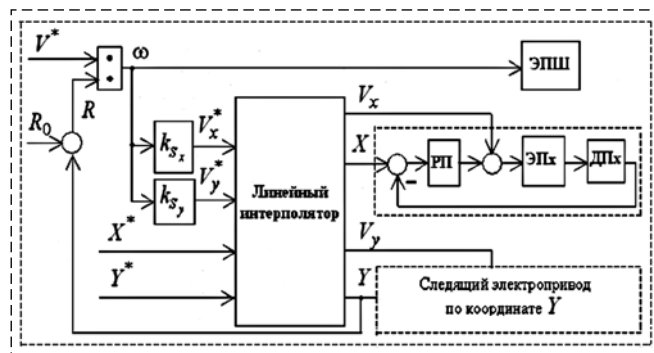


Рис. 4. Принцип организации системы стабилизации скорости резания на токарных станках с ЧПУ

Fig. 4. The principle of organization of the cutting speed stabilization system on CNC lathes

в которых можно выделить три характерных участка движения (разгон, движение с постоянной скоростью, торможение), интерполятор должен обрабатывать не заданные, а текущие значения скоростей подачи V_x^*, V_y^* . Один из распространенных вариантов реализации следящего электропривода основан на принципах комбинированного управления. В соответствии с этим, кроме основного формирования траектории движения по координатам X и Y , интерполятор дополнительно формирует задание на скорости перемещения V_x и V_y .

Обработка торцевых и конусных поверхностей в режиме ССР сопровождается непрерывным изменением частоты вращения шпинделя и скоростей подачи. Поэтому организация системы ССР предъявляет повышенные требования к динамике приводов подачи и главного движения. Резкое изменение скорости резания неблагоприятно влияет на стойкость инструмента. Алгоритмические особенности программ интерполяции в режиме ССР должны также предусматривать ускоренный отвод инструмента и холостые участки (торможения и реверса) для организации циклической обработки.

Модель системы ССР при торцевой обработке

Модель вычислительного процесса системы с ЧПУ (рис. 5) представлена следующими модулями:

1) модулем интерполятора, формирующим текущее положение координаты Y ;

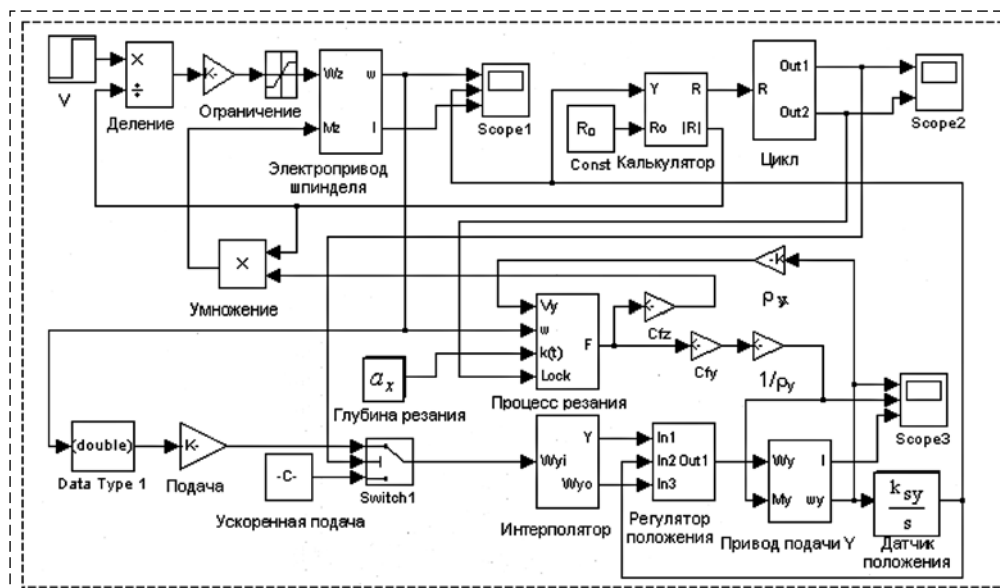


Рис. 5. Модель стабилизации скорости резания на станке с ЧПУ
Fig. 5. Model of stabilization of cutting speed on a CNC machine

2) модулем калькулятора, формирующим значение радиуса и его модуль по разности между его начальным значением и текущим значением координаты;

3) модулем цикла, определяющим точки перехода радиуса обработки через нуль и возврата в начальное положение.

Интерполятор в своем составе содержит два цифровых интегратора. На базе первого из них реализован задатчик интенсивности скорости подачи, а второй использован для формирования задающей координаты, поступающей совместно с сигналом задания частоты вращения на вход цифрового привода подачи. Дискретные передаточные функции интеграторов на программном уровне соответствуют их работе соответственно по методу прямоугольников и трапеций. Период квантования информации по времени интерполятора и привода подачи равен одной микросекунде. Это соответствует периоду прерывания современных систем с ЧПУ при выполнении основных задач управления и протоколов передачи информации по оптоволокну между системой с ЧПУ и цифровым приводом.

Структура цифрового сервопривода подачи включает в себя регулятор положения и соответствует комбинированной системе регулирования с подчиненными контурами скорости и тока.

При разработке модели привода шпинделя за основу принята система регулирования с контуром тока и двойным контуром скорости. Контур скорости в этом случае настроен

на модульный оптимум по управлению и на симметричный оптимум по возмущению.

Формирование гиперболической зависимости частоты вращения шпинделя от радиуса обработки осуществляется с помощью операции деления. При этом модули калькулятора и цикла исключают ситуации деления на ноль в моменты прохождения радиуса обработки через нулевые состояния. Формирование момента нагрузки для привода шпинделя осуществля-

ется с помощью операции умножения, представленной отдельным блоком. Модель электропривода шпинделя также содержит внутренний контур, имитирующий потери холостого хода.

Процесс резания при торцевой обработке в целом соответствует структуре, представленной на рис. 1. Исключение составляет подача по координате V_x , которая при формировании цикла обработки используется для отвода резца и задания припуска на обработку. Для упрощения припуск представлен величиной a_x , которая соответствует глубине резания при обработке торцевых поверхностей заготовки.

Результаты моделирования

Диаграммы работы представлены на рис. 6.

В диапазоне низких скоростей и темпа их изменения ток нагрузки I двигателя главного движения пропорционален текущему радиусу обработки.

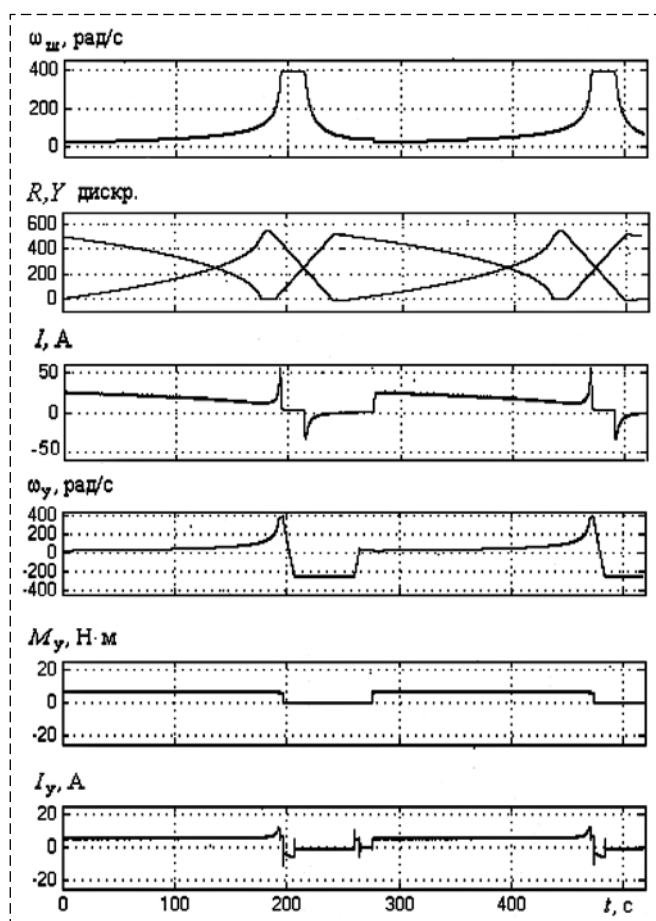


Рис. 6. Диаграммы работы модели системы с ЧПУ в режиме ССР
Fig. 6. Diagrams of the NC model in the cutting speed stabilization mode

При приближении к центру изделия увеличивается темп изменения частоты вращения шпинделя, и указанная пропорциональность нарушается за счет существенного возрастания динамического тока. Выход на участок движения, соответствующий ограничению скорости, сопровождается сбросом тока на значение потерь холостого хода. В точке перехода радиуса R через нуль происходит реверс движения по координате Y и переход на ускоренную подачу. За счет инерционности переходных процессов привод подачи переходит через центр дважды. Аналогичный процесс наблюдается на участке, соответствующем выходу на начальный радиус обработки. Таким образом, скоростная обработка должна сопровождаться разработкой алгоритмов, предусматривающих участки выбегов и циклической обработки изделий.

Заключение

Таким образом, рассмотренная модель системы ССР позволяет имитировать циклы скоростных режимов обработки, которые могут быть использованы для проработки дополнительных функций ЧПУ. Данную модель можно использовать как основу для других возможных вариантов обработки, в том числе многокоординатной обработки с изменением подач в зависимости от усилий резания. При скоростных режимах резания целесообразно использовать предварительный (визуальный) просмотр отработки кадра для исключения возможных коллизий. Для повышения быстродействия в этом случае целесообразно использовать стандартные методы решения дифференциальных и разностных уравнений с выводом графика отработки.

Список литературы

1. Тимирязев В. А., Дудко С. А., Хворов И. А. Повышение эффективности многоцелевых станков путем расширения состава применяемого режущего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 143–149.
2. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. 296 с.
3. Мартинов Г. М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 1.
4. Григорьев С. Н. Принципы создания многофункциональной системы числового программного управления технологическим оборудованием на базе общего ядра с открытой модульной архитектурой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 5. С. 1–11.

5. **Корытин А. М., Петров Н. К., Радимов С. Н., Шапарев Н. К.** Автоматизация типовых технологических процессов и установок. М.: Энергоатомиздат, 1988. 432 с.

6. **Alajmi M. S., Oraby S. E.** On the influence of the speed-feed interaction on the wear rate and life of multiple coated carbide inserts considering rough turning process // *Applied mechanics and materials*. 2014. Vol. 575. P. 431–436.

7. **Патент № 2420776 (РФ).** Устройство для управления станком / В. М. Иванов. Оpubл. Бюл. № 16, 2011.

8. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещярякова. М.: Машиностроение-1, 2003. 944 с.

9. **Ulsoy A. G., Koren Y.** Control of Machining Processes // *Asme j. of dynamic systems, measurement and control*. 1993. Vol. 115, N. 2(B). P. 301–308.

10. **Глушко В. В., Шумов В. А.** Автоматическое регулирование режимов резания на двухсуппортных токарных станках // *Станки и инструмент*. 1973. № 6. С. 8–9.

11. **Озерянный Н. А.** Системы с параметрической обратной связью. М.: Энергия, 1974. 152 с.

12. **Иванов В. М.** Идентификация параметров и алгоритмы самонастройки в системах стабилизации усилия резания // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012. № 5. С. 56–64.

Simulation Model of the Cutting Speed Stabilization System for CNC Metal-Cutting Machine Tools

V. M. Ivanov, v.ivanov@ulstu.ru,

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

Corresponding author: **Ivanov Vladimir M.**, Ph. D., Associate Professor Faculty of Power, of Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation, e-mail: v.ivanov@ulstu.ru

Accepted on October 10, 2019

In this paper a simulation model of cutting speed stabilization for numerical control machines was developed. The mode of cutting speed stabilization allows solving a number of technological problems, including the increase in machining productivity and the quality of the part surface, the increase in durability of the cutting tool.

Access to the functions of the basic software of CNC systems is limited. Taking this into account, this paper considers the functional and algorithmic features of the power parameter stabilization systems, as the basis for the further development of intelligent algorithmic support and software. The existing guidance on cutting conditions is based on empirical dependencies, the use of which for direct application in algorithms for the cutting process automatic control is difficult, since these dependencies determine the predicted, not the current, parameters. The non-stationary model was adopted as the basic structure of the process of shaping parts, the main non-stationary model parameters are determined by the three-dimensional kinematics of the universal machine. The generalized approach to the power parameter systems and the synthesis of the regulators of their main circuits made it possible to identify the simplest version of the structures based on the use of the regulators with parametric feedback. The functional model contains the main components of the CNC system: an interpolator, servo drives of feeds and main motion, as well as additional cycle and analysis modules. The high-speed processing of end surfaces and the conditions for the implementation of cyclic control tasks are considered. The simulation results confirming the performance of functional algorithms and the possibility of their use in intelligent CNC systems are presented.

Keywords: cutting speed, shaping, electric drive, interpolator

For citation:

Ivanov V. M. Simulation Model of the Cutting Speed Stabilization System for CNC Metal-Cutting Machine Tools, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 110–116.

DOI: 10.17587/mau.21.110-116

References

1. **Timiryazev V. A., Dudko S. A., Khvorov I. A.** Improving the efficiency of multi-purpose machines by expanding the composition of the used cutting tool, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2016, no. 11, pp. 143–149 (in Russian).

2. **Sosonkin V. L., Martinov G. M.** Systems of numerical program control, Moscow, Logos, 2005, 296 p. (in Russian)

3. **Martinov G. M.** Modern trends in the development of computer control systems of process equipment, *Vestnik MGTU "Stankin"*, 2010, no. 1 (in Russian).

4. **Grigor'yev S. N.** Principles of creating a multifunctional system for numerical control of technological equipment based on a common core with an open modular architecture, *Pribory i Sistemy. Upravleniye, Kontrol', Diagnostika*, 2011, no. 5, pp. 1–11 (in Russian).

5. **Korytin A. M., Petrov N. K., Radimov S. N., Shaparev N. K.** Automation of typical technological processes and installations, Moscow, Energoatomizdat, 1988, 432 p. (in Russian).

6. **Alajmi M. S., Oraby S. E.** On the Influence of the Speed-Feed Interaction on the Wear Rate and Life of Multiple Coated Carbide Inserts Considering Rough Turning Process, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 575, pp. 431–436.

7. **Патент № 2420776 (РФ).** Device for controlling the machine / V. M. Ivanov. Opubl. Byul. No. 16, 2011 (in Russian).

8. **Dal'skogo A. M., Suslov A. G., Kosilova A. G., Meshcharyakov R. K.** ed. Directory technologist-mechanical engineer, vol. 2, Moscow, Mashinostroyeniye-1, 2003, 944 p. (in Russian).

9. **Ulsoy A. G., Koren Y.** Control of Machining Processes, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1993, vol. 115, no. 2(B), pp. 301–308.

10. **Glushko V. V., Shumov V. A.** Automatic adjustment of cutting conditions on two-support lathes, *Stanki i Instrument*, 1973, no. 6, pp. 8–9 (in Russian).

11. **Ozeryannyu N. A.** Systems with parametric feedback, Moscow, Energiya, 1974, 152 p. (in Russian).

12. **Ivanov V. M.** Identification of Parameters and Algorithms of Self_Adjustment in Systems of Stabilization of Cutting Force, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 5, pp. 56–64 (in Russian).

С. А. Кабанов, д-р техн. наук, проф., kaba-sa@mail.ru,
Б. А. Зимин, канд. физ.-мат. наук, доц., bazimin@mail.ru,
Ф. В. Митин, аспирант, fedor28@list.ru,

Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Разработка и исследование математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть II^{1, 2}

Рассмотрен процесс настройки радиоотражающего сетеполотна крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования. Рефлектор состоит из фронтальной сети, которая натянута на силовой каркас, вант, с помощью которых происходит оттяжка фронтальной сети к тыльной сети для задания необходимой формы отражающей поверхности. Решена задача настройки и определения формы радиоотражающего сетеполотна как в одной плоскости, так и в трех плоскостях. В общем виде задача настройки формы радиоотражающего сетеполотна решается за счет воздействия на конструкцию актюаторов — исполнительного устройства системы управления. Для корректного функционирования рефлектора на орбите требуется возможность управления формой отражающей поверхности путем натяжения фронтальной сети. Для образования и поддержания формы рефлектора фронтальная и тыловые сети соединены вантовыми подкреплениями (оттяжками). Ванты соединяют противоположные узлы сетей. Вантовая система является основой для построения системы поднастройки. Миниатюрные мехатронные модули могут быть расположены на каждой из подстраиваемых вант. Для регулировки формы в одной плоскости применена методика гибких нитей. Показана возможность изменения поверхности одновременным воздействием одного или нескольких актюаторов. Для настройки формы в пространстве применен метод мембраны, описываемый уравнением Лапласа. В качестве актюаторов для задания формы рассмотрены пьезопривод, двигатель постоянного тока и сервомотор. За математическую модель пьезоактюатора принята модель А. А. Никольского. Система решается с учетом жесткого закрепления ответной части рефлектора. Проведено сравнение применения ПИД регулятора и оптимального регулятора. Из принципа максимума выявлена структура оптимального управления. Возникающая двухточечная краевая задача решается методами наискорейшего спуска и Ньютона. Показано, что применение оптимального управления позволяет сократить время переходного процесса. Аналогичная задача была решена для двигателя постоянного тока и сервомотора. Для всех актюаторов показано преимущество использования методов оптимального управления. Предложено решение задачи с помощью алгоритма с коррекцией параметров структуры управления.

Ключевые слова: математическая модель, моделирование, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, настройка формы, сетеполотно, актюатор

Введение

Основными показателями трансформируемых систем являются высокая точность формы отражающей поверхности после развертывания, ее стабильное состояние в процессе всего периода эксплуатации, надежность раскрытия.

Анализируя существующие разрабатываемые виды больших космических антенн [1, 2], можно сделать вывод, что одним из перспективных направлений является создание крупногабарит-

ного трансформируемого рефлектора (КТР) космического базирования с использованием тросовой системы поддержания формы рефлектора.

Рассмотрим конструкцию КТР с использованием тросовой (вантовой) системы поддержания формы рефлектора (рис. 1). Особенность такой конструкции заключается в большой площади рабочей поверхности в раскрытом состоянии и возможности управления формой рефлектора. Ключевым элементом такого вида антенн является устройство точечной регулировки формы рефлектора. Именно оно должно обеспечивать высокую точность рефлектора и малое среднеквадратичное отклонение (СКО).

Рефлектор состоит из фронтальной сети, которая натянута на силовой каркас, вант, с помо-

¹ Исследования представленные в I и II частях статьи выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00646 А.

² Часть I опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2020, Т. 21, № 1.

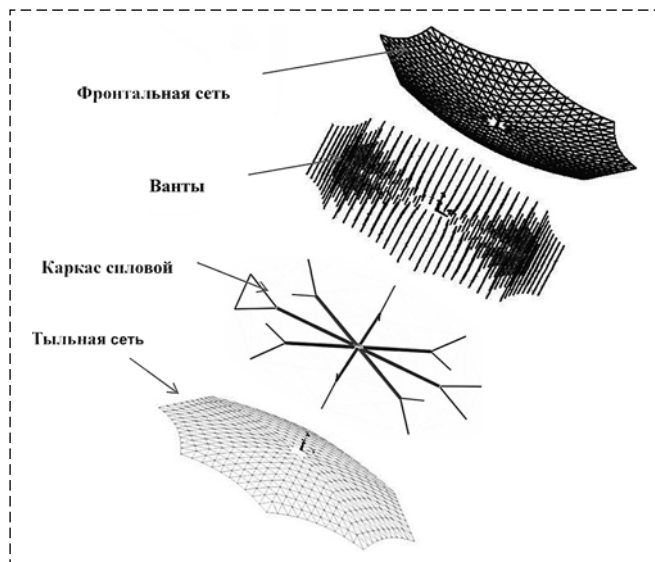


Рис. 1. Крупногабаритный трансформируемый рефлектор
 Fig. 1. The large transformable reflector

стью которых происходит оттяжка фронтальной сети к тыльной сети для задания необходимой отражающей поверхности.

В общем виде задача настройки формы радиоотражающего сетеполотна КТР решается за счет воздействия на конструкцию исполнительного устройства системы управления — актюаторов.

Автоматические системы, в которых энергия для настройки рефлектора производится за счет приводов, в частности пьезоактюатора, двигателя постоянного тока (ДПТ), сервомотора, позволяют управлять процессом настройки и поддержания, тем самым поддерживать рефлектор в рабочем состоянии на всем времени его эксплуатации.

Использование таких приводов требует наличия системы управления, базирующейся на использовании информации о состоянии системы. Поэтому дополнительно встает вопрос о датчиках обратной связи, их числе, точности и периодичности работы, вследствие чего может возникнуть задача фильтрации данных, задача программирования или синтеза управления. Как итог, на основе численного моделирования необходимо выработать стратегию управления настройкой КТР.

Следует отметить, что особую актуальность вопросу придает тот факт, что за последнее десятилетие достигнут огромный прогресс в компьютерной технике, который позволяет выполнять объемные вычислительные операции за короткое время. Вследствие этого целе-

сообразно для развертывания КТР применять алгоритмы оптимального управления [3—7].

Для корректного функционирования рефлектора на орбите требуется возможность управления формой отражающей поверхности путем натяжения фронтальной сети.

Рассмотрим настройку радиоотражающего сетеполотна крупногабаритной трансформируемой космической конструкции. Внешний вид антенны представлен на рис. 1. Конструктивно антенна состоит из силового каркаса, формирующей структуры и радиоотражающего сетеполотна.

Формообразующая структура предназначена для формирования формы радиоотражающей поверхности рефлектора и поддержания ее в процессе всего срока эксплуатации спутника. Она состоит из фронтальной и тыловой сетей, связываемых между собой системой вант. Формообразующая структура служит основой построения системы поднастройки рефлектора, так как имеет большое число кинематических связей с поверхностью рефлектора.

Для образования и поддержания формы рефлектора фронтальная и тыловые сети соединены вантовыми подкреплениями (оттяжками). Ванты соединяют противоположные узлы сетей. Наземная настройка заключается в подстройке начальных длин оттяжек с учетом влияния сил гравитации и системы обезвешивания.

Вантовая система является основой для построения системы поднастройки. Миниатюрные мехатронные модули могут быть расположены на каждой из подстраиваемых вант. В основе мехатронного узла лежит миниатюрный линейный привод.

Настройка сетеполотна в одной плоскости

Рассмотрим плоскую модель управления формой сетеполотна. На рис. 2 приведена одна спица, два главных радиальных шнура тыльной и фронтальной сетей и ванты, идущие между ними.

Здесь 1 — шнур, соединяющий концы звеньев 2 и 3 (позволяющие задать параболическую форму сетеполотна); 2 и 3 — концевые звенья спицы; 4 — главный радиальный шнур фронтальной сети; 5 — главный радиальный шнур тыльной сети; 6 — корневое звено спицы; 7 — ванты, соединяющие главные радиальные шнуры с узлами фронтальной и тыльной сетей.

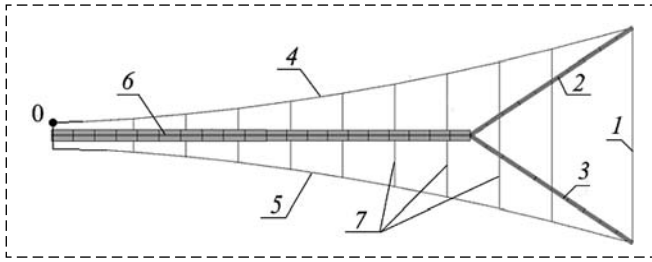


Рис. 2. Ванты, спица и главные радиальные шнуры (вид сбоку)
Fig. 2. The gore, spoke and main radial cords (side view)

В качестве начала координат выберем точку крепления главного радиального шнура фронтальной сети к основе силового каркаса (точка 0 на рис. 2).

Ввиду симметрии левой и правой ветвей параболы, а также принимая во внимание тот факт, что центральная точка в основании корневого звена спицы и концевые точки жестко закреплены, будем исследовать управление только правой части.

В каждой ванте находится по одному актюатору. Настройка формы происходит путем изменения длины ванты в каждой точке крепления ванты к фронтальной сети.

Выведем уравнения, описывающие зависимость формы сетеполотна от силы натяжения в определенных точках этого полотна. Для этого определим форму, которую имеет фронтальная сеть. Рассмотрим случай настройки формы отражающей поверхности в космическом пространстве путем натяжения формы только в одной плоскости.

Рассмотрим часть сетеполотна с двумя фиксированными точками (*A* и *B*) и приложенной силой между ними (рис. 3). Запишем уравнение равновесия для такой системы при условии, что стрела провисания нити мала по сравнению с горизонтальным пролетом между этими фиксированными точками [8].

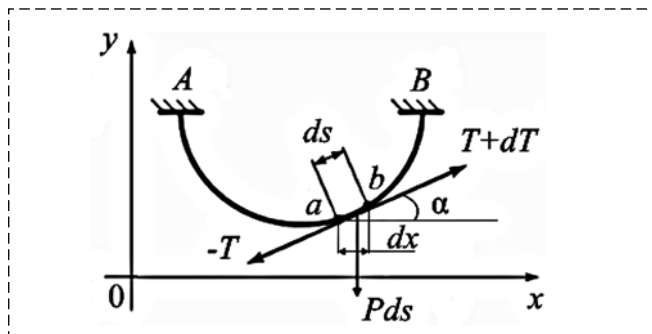


Рис. 3. Силы в сетеполотне при заданном натяжении
Fig. 3. Forces in the network at a given tension

Примем, что сила натяжения нити *T* равна константе, и приложение силы *P* происходит достаточно медленно, так что можно считать данный режим статическим. Рассмотрим равновесие элемента нити $ab = ds$. В точке *a* на нить действует натяжение нити *T*, тогда в точке *b* будет действовать сила *T + dT*. Помимо этого на элемент *ds* действует сила *Pds*.

Тогда, используя графический метод [9, 10], т. е. записав проекции действующих сил на оси координат, можно получить:

$$0x: (T + dT) \frac{dx}{ds} - T \frac{dx}{ds} = 0;$$

$$0y: (T + dT) \frac{dy}{ds} - T \frac{dy}{ds} - Pds = 0.$$

Раскрыв скобки и проделав необходимые математические преобразования, получим $dT \frac{dx}{ds} = 0$ и $\frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) - P = 0$. Из первого выражения следует, что $T \frac{dx}{ds} = C_1 = \text{const}$, т. е. проекция натяжения на ось *x* есть величина постоянная.

Сила натяжения *T* направлена по касательной к кривой фронтальной сети. Тогда можно записать, что $\cos \alpha = \frac{dx}{ds}$ и $C_1 = T \cos \alpha$, где α — угол между касательной к кривой сетеполотна и осью 0*x*. Силу воздействия на сеть запишем как $P = q(x) \frac{dx}{ds}$, где $q(x)$ — распределенная по длине нагрузка (в случае наличия *n* точек натяжки можно записать $\frac{1}{n} \sum P_i$, где *i* — номер точки приложения силы).

Нить сетеполотна, находящаяся в равновесии под действием вертикальной нагрузки, имеет форму параболы [10].

Определим форму радиоотражающего сетеполотна по трем точкам в зависимости от приложенной силы *P* (рис. 4). Точки 0 и *B* будем

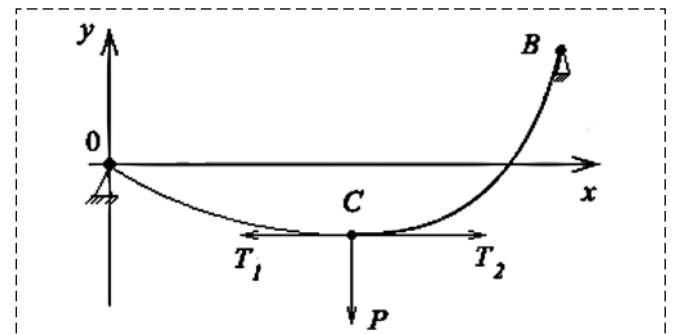


Рис. 4. Форма сетеполотна при приложении силы *P*
Fig. 4. Network form when force *P* is applied

считать жестко закрепленными и не перемещающимися. Примем, что отрезки $0C$ и CB являются параболами с пересечением в точке C . Тогда для этих парабол, приняв, что подстрочные индексы 1 и 2 обозначают принадлежность к первой и второй параболе соответственно, а E_1 и E_2 — коэффициенты, запишем:

$$0C: y_1 = \frac{q}{C_{11}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_1 x \right) + E_1;$$

$$CB: y_2 = \frac{q}{C_{12}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_2 x \right) + E_2.$$

Запишем проекции действующих сил в точке C на оси:

$$0x: -T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 = 0; \quad (1)$$

$$0y: -T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 - P = 0. \quad (2)$$

Из уравнения (1) получаем $C_1 = C_2 = C$. Далее, подставив $T_1 = T_2 = \frac{C}{\cos \alpha_1} = \frac{C}{\cos \alpha_2}$ в уравнение (2), получаем

$$-C \operatorname{tg} \alpha_1 + C \operatorname{tg} \alpha_2 - P = 0.$$

Для общей точки C из условия $y_1 = y_2$ на-
ходим:

$$\frac{q}{C_{11}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_1 x \right) = \frac{q}{C_{12}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_2 x \right) + E_2.$$

Для настройки формы радиоотражающей поверхности необходимо выбрать точку настройки, отрегулировать ее положение и сравнить получившуюся кривую с желаемой кривой. Увеличение числа точек регулирования ведет к увеличению числа уравнений, связывающих каждую точку с другой.

Определение силы натяжения

Для проведения моделирования рассмотрим частную задачу. Нить сетеполотна натянута между двумя фиксированными точками с координатами $0 = [0; 0]$ и $B = [10; 2]$ и имеет форму параболы, описываемую уравнением $y = 0,02x^2$. Координаты точки C при заданной форме примем $C = [5; 0,5]$. Нить находится в натянутом состоянии, т. е. силы натяжения нити T уравновешены силой оттяжки P .

Необходимо перенастроить форму антенны в виде параболы в заданную форму, определя-

емую уравнением $y = 0,025x^2 - 0,05x$ при фиксированных граничных точках. Точка C при этом будет иметь координаты $C = [5; 0,375]$. Задача состоит в определении силы P .

Сделаем следующие допущения, необходимые для решения поставленной задачи. Нить сетеполотна находится в космическом пространстве, и на нее не действуют силы тяжести. Минимальная длина нити L_{\min} определяется по прямой, соединяющей точки 0 и C .

Определим длину нити в свободном состоянии при закрепленных конечных точках (кривая l на рис. 5):

$$L_{\min} = \sqrt{l^2 + h^2} = 10,198.$$

Исходя из закона Гука можно записать

$$\Delta T = \frac{\Delta l}{L} ES, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$ — разность сил натяжения нити в точке C (рис. 5); $\Delta l = l_2 - l_1$ — разность длин нити на участке CB и $0C$; E — модуль упругости; S — площадь сечения нити.

Из уравнения (2) выразим силу натяжения нити P :

$$P = -T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2.$$

В точке C : $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Поэтому можно переписать

$$P = (T_2 - T_1) \sin \alpha = \Delta T \sin \alpha. \quad (4)$$

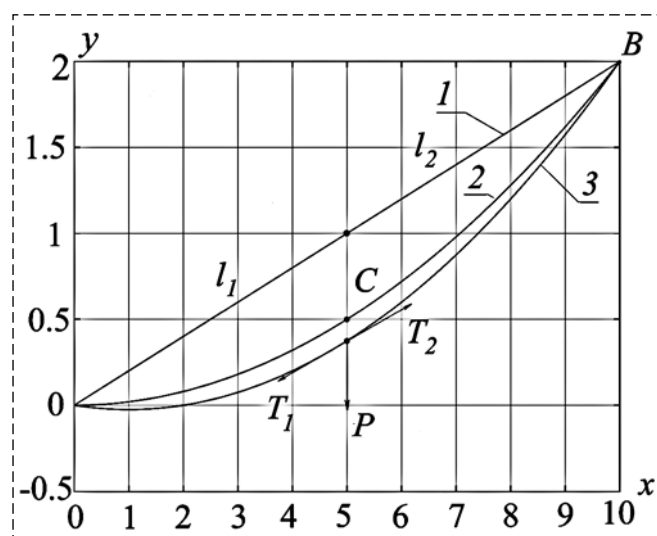


Рис. 5. Определение приложенной силы P
Fig. 5. Determination of applied force P

Так как $y' = \operatorname{tg}\alpha$, то можно вычислить значение угла α .

Определим значение силы оттяжки P при ненатянутом состоянии (кривая 1 на рис. 5). Так как $\Delta l = 0$, то, соответственно, из (4) имеем $P = 0$. Нить находится в свободном состоянии.

При форме параболы, описываемой уравнением $y = 0,02x^2$ (кривая 2 на рис. 5), находим длину нити $l_1 = 5,06$ и $l_2 = 5,26$. По формуле (3) находим ΔT . Принимаем, что нить состоит из вольфрама ($E = 350 \cdot 10^9$ Па), диаметр нити равен 3 мм. Тогда $\Delta T = 1,9 \cdot 10^6$. Из соотношения (4) вычисляем силу, потребную для поддержания исходной формы: $P = 6632$ Н.

Проделаем аналогичные вычисления для желаемой параболы, описываемой уравнением $y = 0,025x^2 - 0,05x$ (кривая 3 на рис. 5): $P = 44\,137$ Н.

Настройка сетеполотна в пространстве

Для определения формы радиоотражающего сетеполотна в пространстве удобно представить ее в виде мембраны. Тогда дифференциальное уравнение мембраны можно описать уравнением Лапласа [11]:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\frac{q}{S}, \quad (5)$$

где x, y, z — оси координат; q — распределенная нагрузка; S — площадь поверхности.

При решении задачи определения формы радиоотражающего сетеполотна удобно перейти к полярным координатам, так как рефлектор имеет форму параболоида. В этом случае в силу симметрии уравнение, описывающее прогиб мембраны, сводится к следующему:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} = -\frac{p}{S}.$$

На рис. 6 представлен пример определения формы сетеполотна на одной фасете (части отражающей поверхности).

Полагая $q = 0$ в уравнении (5), т. е. считая, что на мембрану не действует поперечная нагрузка, приходим к уравнению

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0.$$

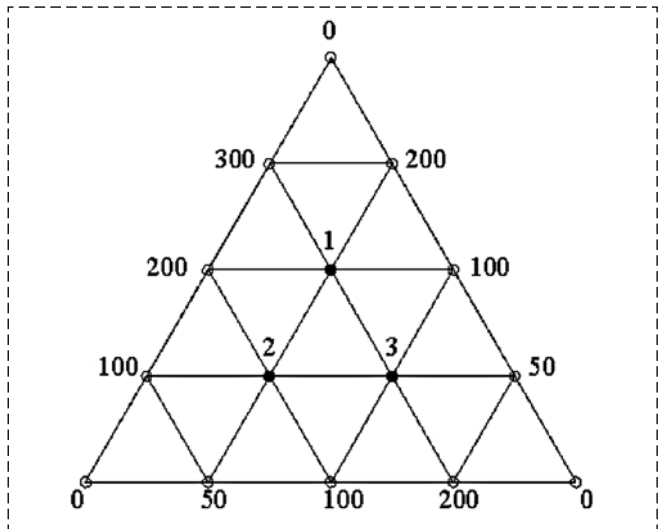


Рис. 6. Фасета радиоотражающего сетеполотна
Fig. 6. Facet of radioreflexion network

Для определения узловых значений функции прогиба z составим систему линейных уравнений, удовлетворяющую уравнению Лапласа:

в точке (1): $300 + 200 + 100 + 200 + z_2 + z_3 - 6z_1 = 0$;
в точке (2): $100 + 200 + 100 + 50 + z_1 + z_3 - 6z_2 = 0$;
в точке (3): $100 + 100 + 200 + 50 + z_1 + z_2 - 6z_3 = 0$.

Решение этой системы следующее:

$$z_1 = 175, z_2 = 125, z_3 = 125.$$

Это и есть значение прогиба в данных точках. По значениям функции z можно аппроксимировать, например, методом меньших квадратов, параболоид. Если мембрана испытывает какое-либо давление, то в правых частях уравнений появятся соответствующие слагаемые вместо нуля.

Как результат, исходя из заданной формы сетеполотна можно вычислить значение усилий, необходимых для натяжения и настройки формы, а также посчитать разницу в прогибах при нынешней форме и при желаемой.

Настройка формы радиоотражающей поверхности проводится за счет управления актюаторов поодиночке или совместно некоторой группой в зависимости от поставленной задачи.

Моделирование актюаторов

В качестве актюаторов рассматривались пьезопривод, двигатель постоянного тока (ДПТ), сервопривод.

Рассмотрим применение пьезоактюатора [12]. Отметим, что применение пьезоэлектрических элементов общеизвестно, например, для регистрации деформации деталей конструкции, когда пьезоэлементы устанавливаются на деталях и перемещаются по мере деформирования детали. Вместе с тем пьезоэлементы оказывают целенаправленное воздействие на деталь, в частности, деформируют ее. В авиации пьезоэлементы применяются для аэродинамических профилей, сонаров, гидрофонов, гироскопов, а также для больших вогнутых зеркал, например в телескопах, и во многих других случаях [13–15].

Пьезоэлектрические материалы и элементы на их основе высоконадежны, устойчивы к воздействию различных агрессивных сред, имеют малые массогабаритные показатели, высокую радиационную стойкость и термостойкость, диэлектрическую природу [16]. Данные свойства особенно важны при проектировании аппаратуры, предназначенной для работы в космосе. В связи с этим в ряде работ рассматривается использование данного типа актюаторов в космической отрасли [17–19].

Для решения задачи управления пьезоактюатором следует определиться с его конструктивными особенностями и на основании этого ввести ряд условий и допущений.

Будем считать, что пьезоактюатор, закрепленный на тыльной сети рефлектора космического аппарата, неподвижен, имеет известные первоначальные размеры: l_0 , S — начальная длина и поперечное сечение актюатора. Первоначальный размер изменяется под действием электрического поля, перемещая приведенную массу m_0 . Таким образом, суммарная масса m_Σ состоит из массы самого пьезоактюатора m_a и перемещаемой массы.

При дальнейшем решении задачи принимаются также следующие допущения:

- изменение размера актюатора на один-два порядка меньше его изначального размера;
- актюатор допустимо рассматривать как один монолитный элемент;
- актюатор перемещается только вдоль одной оси.

С учетом принятых допущений и условий воспользуемся математической моделью Никольского [20] для монолитного пьезоэлемента, который рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами.

Система дифференциальных уравнений, описывающих пьезоэлемент с исполнительным органом, имеет следующий вид [20]:

$$\begin{aligned} \Delta l &= V; \\ \dot{V} &= \frac{K_0 U + F_c - K_y \Delta l - K_d V}{m_\Sigma}; \\ \dot{U} &= \frac{e_{\text{п}}}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{U}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{K_{\text{п}} V}{C_0 K_d}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Δl — изменение длины (ход) актюатора; V — скорость выдвижения актюатора; K_0 — коэффициент обратного пьезоэффекта; U — напряжение, приложенное к электродам актюатора; F_c — статическое усилие; K_y — коэффициент упругости; K_d — коэффициент внутреннего демпфирования; $e_{\text{п}}$ — напряжение от источника электродвижущей силы (питания); C_0 — емкость; $R_{\text{вт}}$ — внутреннее сопротивление; $K_{\text{п}}$ — коэффициент прямого пьезоэффекта.

В этой линейной динамической модели пьезоактюатора (6) не учтено влияние потерь на внутреннее трение (механические потери) и дипольную релаксацию (диэлектрические потери). Дипольная релаксация и внутреннее трение — это сложные и многообразные процессы, действующие на молекулярном и даже на электронном уровне. Эта модель актюатора может рассматриваться в качестве первого приближения.

Система уравнений (6) решалась с учетом неподвижности и жесткого закрепления ответной части рефлектора.

Задача управления состоит в приведении пьезоактюатора из начального положения ($\Delta l_0 = 0$ м; $V_0 = 0$ м/с; $U_0 = 0$ В) в заданное конечное состояние ($\Delta l_f = 1 \cdot 10^{-7}$ м; $V_f = 0$ м/с; $U_f = 0$ В) при ограничении на управление, за которое принято напряжение от источника электродвижущей силы $e_{\text{п}} = \pm 10$ В.

При наличии постоянно меняющихся внешних условий и возмущающих факторов важной задачей является максимальное быстрое действие при регулировании как каждого отдельно взятого актюатора, так и группы актюаторов. Для выбора управления сравним использование различных вариантов структуры пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД регулятора) и оптимального регулятора [3, 6, 7].

При моделировании системы (6) с использованием различных структур ПИД регулято-

ра удалось добиться необходимых параметров регулирования. При этом для измерений было доступно линейное перемещение Δl . Время переходного процесса составило $t \approx 2$ с. Настройка коэффициентов ПИД регулятора осуществлялась с помощью тюнинга в блоке PID Controller в Simulink.

Аналогичным образом решается задача управления длиной пьезоактюатора с использованием оптимального регулятора [3, 6, 7].

Для задачи о минимизации времени критерий оптимальности будет иметь вид $J = t_f$

Запишем гамильтониан системы (6):

$$H = P_{\Delta l} V + P_V \left(\frac{K_0 U + F_c - K_y \Delta l - K_d V}{m_{\Sigma}} \right) - P_U \left(\frac{e_{\text{п}}}{R_{\text{вт}} C_0 K_d} - \frac{U}{R_{\text{вт}} C_0 K_d} - \frac{K_{\text{п}} V}{R_{\text{вт}} C_0 K_d} \right).$$

При решении задачи оптимальности по быстрой структуре управления согласно принципу максимума Понтрягина примет вид [3, 6, 7]:

$$e_{\text{п}}(t) = e_{\text{пmax}} \text{sign} P_U(t).$$

Согласно теореме Фельдбаума [21] число предельных переключений управления $e_{\text{п}}$ для системы уравнений (6) не должно превышать двух.

Краевая задача, возникающая из принципа максимума, решалась методом наискорейшего спуска [22]. Данный метод позволил найти начальные значения сопряженных переменных $P_{\Delta l}(0) = -617$, $P_V(0) = -400$, $P_U(0) = 1 \cdot 10^{-5}$, при которых удается перевести систему в заданное конечное состояние.

Результаты моделирования, которое проводилось в программной среде MATLAB Simulink, представлены на рис. 7. Из полученных характеристик можно сделать вывод, что при найденном управлении достигаются конечные заданные значения по линейному перемещению, скорости и напряжению. Стоит отметить, что линейное перемещение происходит без возникновения колебательного процесса, а время достижения конечного состояния существенно меньше, чем у модели с использованием ПИД регулятора, и составляет $t \approx 0,6$ с.

Найденное управление $e_{\text{п}}$ переключается один раз. Как видим (рис. 7), после достижения граничных значений длина выдвижения незначительно просаживается. Связано это с тем, что от $e_{\text{п}}$ зависит напряжение, прило-

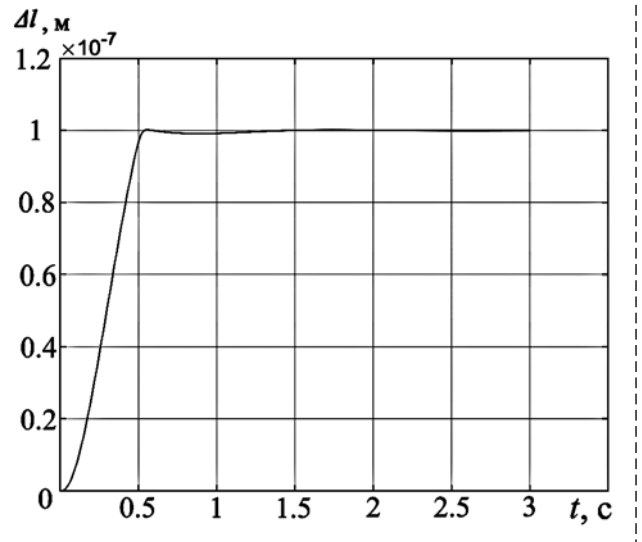


Рис. 7. Длина выдвижения активной части пьезоактюатора
Fig. 7. Extension length of the active part of the piezoactuator

женное к электродам актюатора (U), которое изменяется не релейно, а с некоторым запаздыванием. В связи с этим при достижении граничных условий, когда происходит переключение $e_{\text{п}}$ из минимального в заданное состояние, происходит изменение U . Данный эффект можно минимизировать, если изменить управление не по предельным значениям, а например, трапециевидно. В обоих случаях выбранная из принципа максимума структура управления зависит от моментов ее переключения. Вводя управление моментами переключения структуры с переходом к вспомогательной задаче оптимизации этих моментов [3], целесообразно воспользоваться алгоритмом оптимальной коррекции структуры управления [5, 7]. В этом случае задача оптимизации решается в реальном времени.

Использование оптимального регулятора позволяет сократить время переходного процесса по сравнению с ПИД регулятором. Таким образом, использование алгоритма оптимального регулятора для настройки формы радиоотражающего сетеполотна за счет регулирования пьезоактюатора позволит значительно ускорить этот процесс и, как следствие, поддерживать заданную форму сетеполотна с необходимой точностью.

Двигатель постоянного тока

Электродвигатели являются одним из самых массовых изделий электротехники. Ввиду

своего предназначения (перевод электрической энергии в механическую) данный тип двигателя нашел свое применение во многих областях техники [23, 24]. Это объясняется широким диапазоном и плавностью регулирования скорости вращения электродвигателя.

Несмотря на то что электрическая машина хорошо известна и имеются подробные математические модели, описывающие процессы, происходящие при ее работе, управление, в частности электрическим двигателем постоянного тока, является актуальной задачей [25–29]. Дело в том, что в зависимости от конкретно поставленной задачи будут различаться и алгоритмы управления.

Рассмотрим параметры двигателя постоянного тока (ДПТ), приведенные в работе [30].

Система уравнений, описывающая ДПТ с учетом угла поворота вала, имеет вид [23, 24]

$$\begin{aligned} \dot{I}_я &= \frac{U_a - R_я I_я - k_e \omega_d}{L_я}; \\ \dot{\omega}_d &= \frac{k_m I_я - M_{вн}}{J_я}; \\ \dot{\phi}_м &= \omega_d, \end{aligned} \quad (7)$$

где $I_я$ — ток якоря; U_a — внешнее напряжение; $R_я$ — активное сопротивление обмотки якоря; k_e — коэффициент пропорциональности (постоянная ЭДС двигателя); ω_d — угловая скорость вращения вала двигателя; $L_я$ — индуктивность якорной обмотки; k_m — коэффициент пропорциональности (постоянная момента двигателя); $M_{вн}$ — момент внешних сил; $J_я$ — момент инерции ротора двигателя; $\phi_м$ — угол (механический) поворота вала двигателя.

Задача управления состоит в приведении вала ДПТ из начального положения $\phi_{м0} = 0^\circ$, $\omega_{д0} = 0^\circ/\text{с}$, $I_{я0} = 0^\circ$ А в заданное конечное состояние $\phi_{mf} = 180^\circ$, $\omega_{df} = 0^\circ/\text{с}$, $I_{яf} = 0$ А при ограничении на управление, за которое принято внешнее напряжение питания $U_a = \pm 6$ В. Данный угол поворота $\phi_м$ будет обеспечивать изменение длины ванты.

При управлении в космическом пространстве одной из важных проблем является проблема энергоэффективности, так как запас энергии на рефлекторе ограничен и необходимо выполнить поставленную задачу, минимизируя энергетические затраты. Для выбора управления сравним использование различных вариантов структуры ПИД регулятора и оптимальный регулятор.

При проведении моделирования для определения параметров двигателя постоянного тока возьмем в качестве исследуемого объекта двигатель СН1, который является аналогом двигателя tabuchi FA-130.

При моделировании системы (7) с использованием различных структур ПИД регулятора удалось добиться необходимых параметров регулирования системы при применении ПИД регулятора. При этом измерениям был доступен угол $\phi_м$. Время переходного процесса составило $t \approx 0,75$ с. Настройка коэффициентов регулятора осуществлена с помощью тюнинга в блоке PID Controller в Simulink.

Аналогичным образом решается задача управления двигателем постоянного тока с использованием оптимального регулятора [3, 6, 7].

При оптимизации перевода системы из одного положения в другое с фиксированным начальным и конечным состоянием выберем критерий Больца с интегро-терминальным критерием:

$$I = V_f(I_я, \omega_d, \phi_м, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(U_a, t) dt.$$

Положим

$$\begin{aligned} V_f &= 0,5\rho_1[I_я(t_f) - I_{яf}]^2 + 0,5\rho_2[\omega_d(t_f) - \omega_{df}]^2 + \\ &+ 0,5\rho_3[\phi_м(t_f) - \phi_{mf}]^2; \\ f_0 &= 0,5(U_a/Z)^2 k^{-2}, \end{aligned}$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 — весовые коэффициенты; t_0 — начальное время; t_f — конечное время; Z — импеданс обмотки якоря. Поскольку была поставлена задача минимизации энергетических затрат, то в качестве функции f_0 было взято выражение для затрачиваемого напряжения питания U_a на всем интервале моделирования.

Гамильтониан системы (7) имеет вид:

$$\begin{aligned} H &= P_{\phi_м} \omega_d + P_{\omega_d} \frac{k_m I_я - M_{вн}}{J_я} + \\ &+ P_{I_я} \frac{U_a - R_я I_я - k_e \omega_d}{L_я} + 0,5(U_a/Z)^2 k^{-2}. \end{aligned}$$

Управление находится из условия $\partial H / \partial U_a = 0$ с учетом ограничения на управление:

$$U_a = \begin{cases} 6 & \text{при } U_a > 6; \\ -P_{I_я} \frac{Z}{L_я} & \text{при } -6 \leq U_a \leq 6; \\ -6 & \text{при } U_a < -6. \end{cases}$$

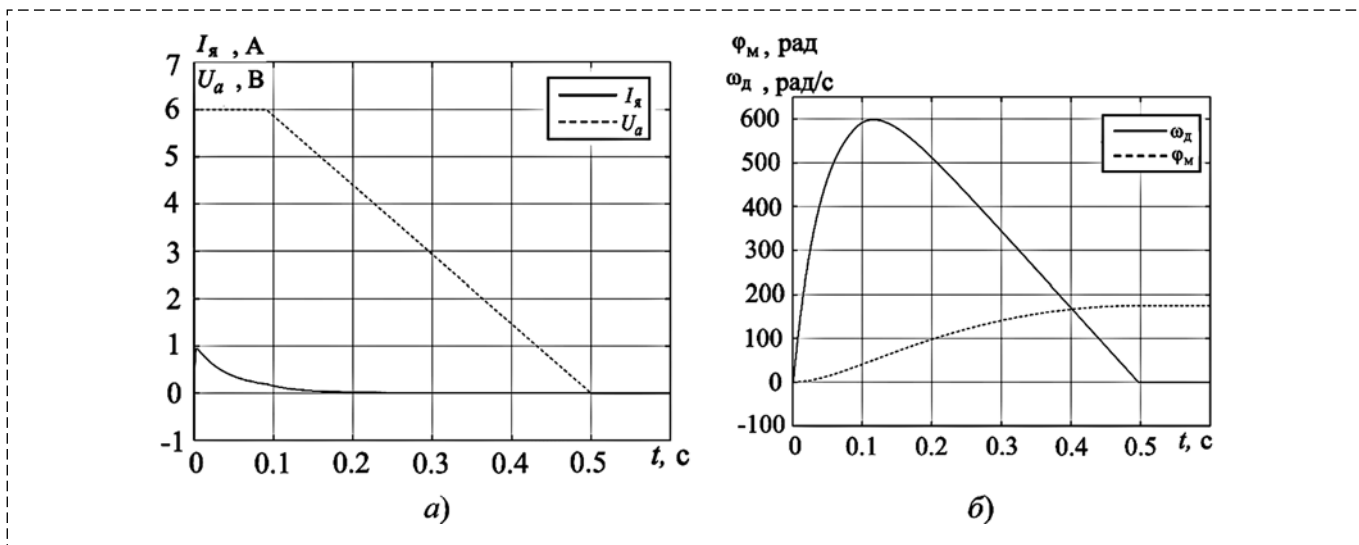


Рис. 8. Динамика угла, угловой скорости (а) и тока, напряжения (б)
 Fig. 8. Dynamics of angle, angular velocity (a) and current, voltage (b)

Для решения данной задачи по принципу максимума необходимо найти начальные приближения сопряженных переменных $P_{\phi_M}(0)$, $P_{\omega_d}(0)$, $P_{I_a}(0)$. Возникшая краевая задача решалась методом наискорейшего спуска [22]. Были найдены начальные значения сопряженных переменных $P_{\phi_M}(0) = -0,0019$, $P_{\omega_d}(0) = 0,01$, $P_{I_a}(0) = 0,1$, при которых удается перевести систему в заданное конечное состояние.

Результаты моделирования представлены на рис. 8.

Из полученных характеристик видно, что найденное управление позволяет достичь конечных значений по углу, угловой скорости, а также току ДПТ. Колебательный процесс в системе не наблюдался. Время переходного процесса составило $t \approx 0,5$ с. При этом удалось снизить энергетические затраты для заданной задачи управления.

Сравнение результатов моделирования при различных начальных и конечных значениях для ПИД регулятора и оптимального регулятора показало преимущество использования алгоритма оптимального управления.

Сервомотор

В связи с отсутствием реализованного редуктора был рассмотрен сервомотор NXT, который является сочетанием ДПТ, редуктора и датчика вращения, объединенных вместе в одном корпусе. Применение и управление данным сервомотором досконально исследованы, поэтому было принято решение использовать

систему (7) для описания двигателя постоянного сервомотора NXT, а коэффициенты пропорциональности $k_e = 0,42$ и $k_m = 0,48$ были рассчитаны исходя из параметров привода, описанных в работе [31].

Для синтеза управления был использован алгоритм, применяемый для ДПТ со следующими условиями: $|U_{a \max}| = 6$ В, $\phi_{Mf} = 180^\circ$, $\omega_{def} = 0^\circ/\text{с}$.

Полученные характеристики схожи с результатами, представленными в работе [32]. Имеются различия в характеристиках тока и угловой скорости, что может быть связано с тем, что примененные методы расчета коэффициентов пропорциональности в работах [31] и [32] разнятся.

Заключение

Для выбранного типа рефлектора допустимо применять механику гибких нитей для определения формы и настройки радиотражающего сетеполотна. Рассматривая задачу в одной плоскости с настройкой формы по трем точкам, можно определить усилия, необходимые для оттяжки нити и задания необходимой формы.

Полученные уравнения позволяют рассчитывать усилие оттяжки для нитей из разных материалов и при разных начальных условиях натяжения.

Данный подход можно расширить на n точек как в одной плоскости, так и в трехмерном пространстве, что приведет к увеличению числа

уравнений, которое будет зависеть от степени точности. Также можно рассматривать зависимость соседних или же нескольких точек.

В качестве актюаторов для настройки формы радиоотражающей поверхности рассмотрены пьезопровод, двигатель постоянного тока, сервомотор. Это позволяет в зависимости от задачи выбрать наиболее выгодный вариант исполнительного устройства. Для всех типов актюаторов решена задача управления при минимизации энергетических затрат. Показано преимущество использования алгоритмов теории оптимального управления. Для решения данных задач в режиме реального времени предполагается использовать алгоритм с коррекцией параметров структуры [3, 5–7, 33, 34].

Список литературы

1. Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2011. № 4. С. 110–119.
2. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкции современных трансформируемых космических антенн (часть 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 78–81.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
4. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.
5. Малышев В. В., Кабанов Д. С. Алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом для построения области достижимости // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 7. С. 21–27.
6. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: СПбГУ, 1997. 200 с.
7. Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Задачи управления с оптимизацией параметров прогнозирующих моделей. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2017. 110 с.
8. Светлицкий В. А. Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
9. Санкин Ю. Н. Лекции по теоретической механике. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 388 с.
10. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.
11. Сальвадори М. Д. Численные методы в технике. М.: ИЛ, 1955. 247 с.
12. Кабанов С. А., Митин Ф. В., Кривушов А. И., Улыбушев Е. А. Управление пьезоактюатором для настройки отражающей поверхности рефлектора космического базирования // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 111–116.
13. Панкратов В. М., Барулина М. А., Крысько А. В. Влияние расстройки парциальных частот чувствительных элементов на амплитудно-частотные характеристики микромеханических гироскопов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 2. С. 99–105.
14. Белоусов Е. О. Метод подавления шумов схемы обработки микроэлектромеханического датчика угловой скорости // Тр. МАИ. 2016. № 90. С. 1–19.
15. Храпцов А. М. Напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов пьезоактюатора: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Томский государственный университет, 2017. 24 с.
16. Бобцов А. А. и др. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 131 с.
17. Hasan Z. Shape and Failure Control of Composite Laminates Using Piezoelectric Actuators // Proc. of the COMSOL Conference, Oct. 7–9, 2010, Boston. P. 314–321.
18. Hasan Z., Muliana A. Analysis and Control of Smart Composite Laminates Using Piezoelectric Materials // Proc. of the 6th Annual Technical Conference of the American Society for Composites 2011: The 2nd Joint US–Canada Conference on Composites, Sept. 26–28, 2011, Montreal, Quebec, Canada. Vol. 1. P. 530–546.
19. Gajbhiye S. C., Upadhyay S. H., Harsha S. P. Nonlinear Vibration Analysis of Piezo-Actuated Flat Thin Membrane // Journal of Vibration and Control. 2015. Vol. 21, Iss. 6. P. 1162–1170.
20. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
21. Фельдбаум А. А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 1953. Т. 14, Вып. 6. С. 712–728.
22. Малышев В. В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления. М.: МАИ-Принт, 2010. 440 с.
23. Вольдек А. И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. заведений. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
24. Kundur P. Power system stability and control. Mc. Graw-Holl, Inc, 1994. 1176 p.
25. Fedor Mitin, Alexey Krivushov (2018). Application of Optimal Control Algorithm for DC Motor, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, pp. 0762-0766, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings110.
26. Гридин В. М. Моментные бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным и дискретно-аналоговым управлением по положению ротора // Электричество. 2017. № 4. С. 50–55.
27. Гуляев И. В., Волков А. В., Попов А. А., Ионова Е. И., Бобров М. А. Сравнительный обзор синхронного двигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного двигателя постоянного тока при непосредственном управлении моментом // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 123–128.
28. Pongfai J., Assawinchaichote W. Optimal PID parametric auto-Adjustment for BLDC motor control systems based on artificial intelligence // 2017 International Electrical Engineering Congress, iEECON 2017 8075892.
29. Hou H., Yao W., Zhang W. A Novel Control Strategy of Single Phase Brushless DC Motor for Automotive Air Conditioning // 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2016 — Proceedings 7791581.
30. Рентюк В. Управление двигателем постоянного тока // Компоненты и технологии. 2014. № 10 (159). С. 110–114.
31. Philo's Home Page [Электронный ресурс]: NXT@motor internals. URL: <http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm> (дата обращения 16.02.2019).
32. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву, Л.: Энергия, 1971. 144 с.
33. Кабанов С. А., Емельянов В. Ю., Митин Ф. В. Оптимизация динамики системы создания формы крупногабаритных трансформируемых антенн космического базирования // Вопросы радиоэлектроники. 2016. Серия ОТ. Вып. 8. С. 54–58.
34. Кабанов С. А., Кривушов А. И., Митин Ф. В. Моделирование совместного раскрытия элементов крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 5 (54). С. 130–151.

Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part II

S. A. Kabanov, kaba-sa@mail.ru, B. A. Zimin, bazimin@mail.ru, F. V. Mitin, fedor28@list.ru, BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: **Mitin Fedor**, Ph.D. Student, Baltic state technical university "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: fedor28@list.ru

Accepted on June 01, 2019

Abstract

The process of deployment elements of constructions and adjustment of the radio-reflecting network of large-sized transformable space-based reflector is considered. The reflector consists of a frontal network, which is stretched on the power frame, cables, with which the front network is pulled to the rear network to set the desired shape of the reflecting surface. The problem of setting and determining the shape of the radio-reflective network is solved both in one plane and in three planes. In general, the task of adjusting the form of a radio reflecting reticle is solved by affecting the design of the actuators — the element of the control system. For the correct functioning of the reflector in orbit, it is necessary to control the shape of the reflecting surface by stretching the frontal network. For the formation and maintenance of the shape of the reflector, the frontal and rear networks are connected by cable-stayed reinforcements (tie rods). The cable connect the opposite network nodes. The cable system is the basis for building a sub-system. Miniature mechatronic modules can be located on each of the adjustable guys. To adjust the shape in one plane, the technique of flexible threads is applied. The possibility of changing the surface by simultaneous action of one or more actuators is shown. To adjust the shape in space, the membrane method described by the Laplace equation is used. The piezo actuator, DC motor and servomotor are considered as actuators for setting the shape. As a mathematical model of the piezoactuator, the model of A. A. Nikolsky is considered. The system is solved taking into account rigid fixation of the reflector response. A comparison of the use of PID-controller and optimal controller. The structure of optimal control is revealed from the maximum principle. The arising two-point boundary value problem is solved by the methods of the steepest descent and Newton. It is shown that the use of optimal control can reduce the time of the transition process. A similar problem was solved for DC motor and servo motor. The advantage of using optimal control methods is shown for all actuators. The solution of the problem with the help of algorithm with correction of parameters of control structure is offered.

Keywords: mathematical model, rotational motion, translational motion, deployment, modeling, large-sized transformable reflector

Acknowledgements: The research presented in parts I and II of the article was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project no. 20-08-00646 A.

For citation:

Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part II, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 117–128.

DOI: 10.17587/mau.21.117-128

References

1. Ponomarev S. V. Transformable reflectors of spacecraft antennas, *Vestn. Tom. gos. un-ta. Matematika i mehanika*, 2011, no. 4(16), pp. 110–119 (in Russian).
2. Lopatin A. V., Rutkovskaja M. A. Overview of the designs of modern transformed space antennas (Part 1), *Vestnik SibGAU*, 2007, no. 2, pp. 78–81 (in Russian).
3. Krasovskii A. A. ed. Handbook on the theory of automatic control, Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).
4. Fedorenko R. P. Approximate solution of optimal control problems, Moscow, Nauka, 1978, 488 p. (in Russian).
5. Malyshev V. V., Kabanov D. S. The algorithm for the correction of the control structure of the automatic underwater vehicle to build a reachable area, *Izv. Vuzov. Priborostroenie*, 2012, vol. 55, no. 7, pp. 21–27 (in Russian).
6. Kabanov S. A. *Upravlenie sistemami na prognoziruuyushchih modelyah* (Systems control on predictive models). SPb: Izd-vo S.-Peterburgskogo universiteta, 1997, 200 p. (in Russian).
7. Kabanov S. A., Kabanov D. S. Control problems with the optimization of the parameters of predictive models, S.Peterburg, Publishing house of Balt. gos. tehn. un-t, 2017, 110 p. (in Russian).
8. Svetlickij V. A. Mechanics of flexible rods and threads, Moscow, Mashinostroenie, 1978, 222 p. (in Russian).
9. Sankin Ju. N. Lectures on theoretical mechanics, Ul'janovsk, UIGTU, 2012, 388 p. (in Russian).
10. Merkin D. R. Introduction to the mechanics of a flexible thread, Moscow, Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1980, 240 p. (in Russian).
11. Sal'vadori M. D. Numerical methods in engineering, Moscow, IL, 1955, 247 p. (in Russian).
12. Kabanov S. A., Mitin F. V., Krivushov A. I., Ulybushchev E. A. Piezoactuator control for adjusting the reflecting surface of a space-based reflector, *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Aviacionnaja tehnika*, 2018, no. 4, pp. 111–116 (in Russian).
13. Pankratov V. M., Barulina M. A., Krysko A. V. Influence of detuning of partial frequencies of sensitive elements on the amplitude-frequency characteristics of micromechanical gyroscopes, *Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika*, 2017, no. 2, pp. 99–105 (in Russian).
14. Belousov E. O. Noise cancellation method for micro-electromechanical angular velocity sensor shema processing, *Tr. MAI*, 2016, no. 90, pp. 1–19 (in Russian).
15. Hramcov A. M. *Stress-strain state of interacting elements of a piezo-actuator*: Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. Nauk, Tomsk, Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2017, 24 p. (in Russian).
16. Bobcov A. A. i dr. Executive devices and systems for microdisplacements, SPb., SPbGU ITMO, 2011, 131 p. (in Russian).
17. Hasan Z. Shape and Failure Control of Composite Laminates Using Piezoelectric Actuators, *Proc. of the COMSOL Conference*, Oct. 7–9, 2010, Boston, pp. 314–321.

18. **Hasan Z., Muliana A.** Analysis and Control of Smart Composite Laminates Using Piezoelectric Materials, *Proc. of the 6th Annual Technical Conference of the American Society for Composites 2011: The 2nd Joint US—Canada Conference on Composites*, Sept. 26–28, 2011, Montreal, Quebec, Canada, vol. 1, pp. 530–546.
19. **Gajbhiye S. C., Upadhyay S. H., Harsha S. P.** Nonlinear Vibration Analysis of Piezo-Actuated Flat Thin Membrane, *Journal of Vibration and Control*, 2015, vol. 21, iss. 6, pp. 1162–1170.
20. **Nikol'skij A. A.** The exact two-channel watching electric drives with piezocompensators, Moscow, Znergoatomizdat, 1988, 160 p. (in Russian).
21. **Feldbaum A. A.** Optimal processes in automatic control systems, *Avtomatika i telemekhanika*, 1953, vol. 14, no. 6, pp. 712–728 (in Russian).
22. **Malyshev V. V.** Optimization methods in problems of system analysis and management: Tutorial, Moscow, Publishing house of MAI-PRINT, 2010, 440 p. (in Russian).
23. **Voldek A. I.** Electric machines. Textbook for high school students. tech. institutions, Leningrad, Jenergija, 1978, 832 p. (in Russian).
24. **Kundur P.** *Power system stability and control*, Mc. Graw-Holl, Inc, 1994, 1176 p.
25. **Fedor Mitin, Alexey Krivushov** (2018). Application of Optimal Control Algorithm for DC Motor, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, pp. 0762-0766, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings110.
26. **Gridin V. M.** Torque contactless DC motors with discrete and discrete analogue control by rotor position, *Jelektrichestvo*, 2017, no. 4, pp. 50–55 (in Russian).
27. **Guljaev I. V., Volkov A. V., Popov A. A., Ionova E. I., Bobrov M. A.** Comparative review of a permanent-magnet synchronous motor and a brushless DC motor with direct torque control, *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*, 2015, no. 6, pp. 123–128 (in Russian).
28. **Pongfai J., Assawinchaichote W.** Optimal PID parametric auto-Adjustment for BLDC motor control systems based on artificial intelligence, *2017 International Electrical Engineering Congress, IEECON 2017* 8075892
29. **Hou H., Yao W., Zhang W.** A Novel Control Strategy of Single Phase Brushless DC Motor for Automotive Air Conditioning, *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2016* — Proceedings 7791581.
30. **Rentjuk V.** Dc motor control, *Komponenty i Tehnologii*. 2014, no. 10 (159), pp. 110–114 (in Russian).
31. **Philo's Home Page** [Electronic resource]: NXT® motor internals, available at: <http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm> (date of the application 16.02.2019).
32. **Petrov Ju. P.** Optimal control of the electric drive, taking into account the restrictions on heating, Leningrad, Jenergija, 1971, 144 p. (in Russian).
33. **Kabanov S. A., Krivushov A. I., Mitin F. V.** Modeling of joint deployment of units of the large-sized transformable reflector of space basing, *SPIIRAS Proceedings*, 2017, vol. 5(54), pp. 130–151 (in Russian).
34. **Kabanov S. A., Emel'janov V. Ju., Mitin F. V.** Optimization of the dynamics of the system for creating the shape of large-size transformed space-based antennas, *Voprosy Radiojelektromikim* 2016, no. 8, ser. OT, iss. 6, pp. 54–58 (in Russian).

Информация

Продолжается подписка на журнал "Мехатроника, автоматизация, управление"

Оформить подписку можно в любом отделении Почты России, через подписные агентства или непосредственно в редакции журнала. Подписной индекс по Объединенному каталогу "Пресса России" — 79492.

- Сообщаем, что с 2020 г. возможна подписка на электронную версию нашего журнала через:
- ООО "ИВИС". Контакты для подписчиков — тел.: (495) 777-65-57, (495) 777-65-58, e-mail: sales@ivis.ru
 - ООО "УП Урал-Пресс". Для оформления подписки (индекс 013310) следует обратиться в филиал по месту жительства — <http://ural-press.ru>

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5510, (499) 269-5397**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 28.11.2019. Подписано в печать 15.01.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН220. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru