

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Администрация Правительства Кузбасса
Администрация г. Новокузнецка
Институт проблем управления им. Трапезникова РАН
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс»**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2023**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)**

12-14 декабря 2023 г.

**Новокузнецк
2023**

УДК 658.011.56
С 409

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. В.В. Зимин (ответственный редактор),
д.т.н., проф. С.М. Кулаков, к.т.н., доц. В.А. Кубарев,
д.т.н., проф. Л.Д. Павлова, д.т.н., доц. И.А. Рыбенко,
к.т.н., доц. В.И. Кожемяченко (технический редактор).

С 409 Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2023: труды Всероссийской научно–практической конференции (с международным участием), 12-14 декабря 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. В.В. Зимина. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – 420 с.

ISBN 978-5-7806-0583-6

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам в области современных систем автоматизации и информатизации учебных, исследовательских и производственных процессов. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 658.011.56

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

СЕКЦИЯ 1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО, ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО И УЧЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 681.5:681.3

О РАЗВИТИИ И ПРИМЕНЕНИИ КОНЦЕПЦИИ НЕВОЗМУЩЁННОГО-ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ И ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Кулаков С.М., Тараборина Е.Н., Койнов Р.С., Кокорев И.С., Спиридонов В.В.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, kulakov-ais@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена сущность концепции Лётова А.М. по проблеме управления летательными аппаратами и её последующее развитие. Дана постановка задачи оптимального управления динамической системой и её декомпозиция. Представлено применение концепции в АСУТП чёрной металлургии. Обоснована необходимость её применения в задачах управления организационными системами.

Ключевые слова: концепция возмущённого и невозмущённого движения, управление, задача оптимального управления, схемы систем автоматизации, реализация в АСУТП и организационных системах.

Abstract. The essence of A.M. Lëtov's concept on the problem of aircraft control and its subsequent development is examined. The formulation of the optimal control problem for a dynamic system and its decomposition are presented. The application of the concept in the automated control systems of black metallurgy is showcased. The necessity of its application in organizational system control tasks is justified.

Keywords: concept of disturbed and undisturbed motion, control, optimal control problem, automation system schemes, implementation in automated control systems and organizational systems.

Термины «невозмущённое движение» и «возмущённое движение» впервые были использованы применительно к исследованию устойчивости, равновесия и движения механических систем. Общая теория устойчивости движения систем была создана А.М. Ляпуновым [1], который опирался на труды предшественников: Эйлера, Рауза, Томсона, Жуковского. Современное определение названных понятий согласно работе [2] выглядит так:

– «невозмущённое движение» – это движение механической системы, соответствующее заданным (известным) силам и начальным условиям; траектория такого движения называется номинальной или опорной;

– «возмущённое движение» есть любое движение механической системы, отличающееся от её известного (заданного) невозмущённого движения.

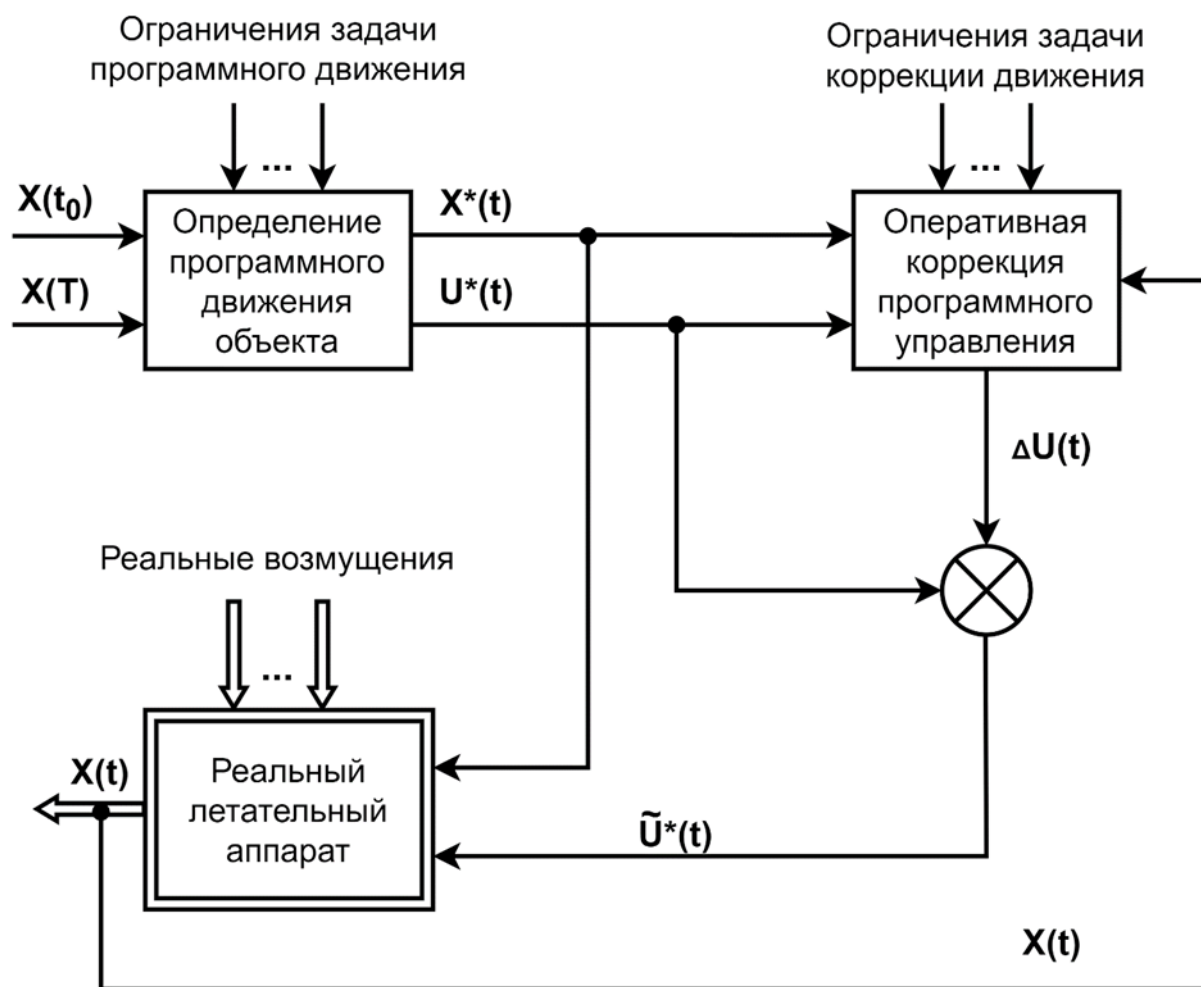
Ляпунов А.М. исследовал задачу устойчивости невозмущённого движения механической системы путем сведения исходной модели системы в виде обыкновенных дифференциальных уравнений движения к задаче устойчивости нулевого положения равновесия, описывающей возмущённое движение.

Опираясь на концепцию невозмущённого-возмущённого движения (НВД-концепцию) Ляпунова А.М. советский учёный Летов А.М. предложил решить сложную проблему автоматического управления летательным аппаратом (самолётом, ракетой и т.п.) посредством ее декомпозиции на две взаимосвязанные проблемы (сложные задачи) [3]:

– проблему программирования оптимальной траектории движения аппарата;

– проблему синтеза автомата, позволяющего оптимально стабилизировать движение аппарата вдоль траектории (при наличии возмущающих воздействий и неточностей математической модели движения аппарата).

Тем самым, Лётюв А.М. применил концепцию «невозмущённого – возмущённого движения» к решению проблемы управления полетом летательного аппарата, (ЛА) и, по сути, создал концепцию программно-стабилизирующего управления (ПСУ - концепцию), которая в дальнейшем получила существенное развитие и способствовала созданию прикладных систем автоматизированного (эргатического) управления сложными технологическими процессами (агрегатами), рисунок 1.



$X(t_0)$, $X(T)$ – векторы параметров состояния объекта в начальный t_0 и конечный T момент времени;

$X^*(t)$, $U^*(t)$ – вектор-функции расчётной траектории движения летательного аппарата и управляющих воздействий (программа изменения управлений);

$\Delta U(t)$ – корректирующее воздействие в момент времени t ;

$\tilde{U}^*(t)$ – вектор параметров скорректированной программы управления.

Рисунок 1 – Схема реализации концепции программно-стабилизирующего управления Лётюва А.М.

1. Постановка и декомпозиция классической задачи оптимального управления динамической системой и её декомпозиция

Пусть динамическая система, как объект управления, представлена математической моделью в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ). По-

ведение системы характеризуется m функциями времени $X(t) = \{x_1(t), \dots, x_m(t)\}$ – переменными состояниями объекта.

Управляющие воздействия на динамическую систему представлены в виде n управляющих функций $U(t) = \{u_1(t), \dots, u_n(t)\}$. Начальное фазовое состояние системы в момент t_0 обозначим $X(t_0) = \{x_1(t_0), \dots, x_m(t_0)\}$. Модель объекта – СОДУ представим в нормальной формуле Коши [4]

$$\frac{dx}{dt} = F(X, U), \quad (1)$$

где $F(X, U)$ – известная вектор-функция $F(X, U) = \{F_1(X, U), \dots, F_m(X, U)\}$...

В соответствии с [5, 6] постановка задачи оптимального управления системой (объектом) выглядит следующим образом.

При известном стартовом состоянии системы (1) – X_0 в начальный момент времени t_0 необходимо определить такие управления $U(t)$, которые переводят ее в конечное состояние $X_T = X(t=T)$ по наилучшей траектории, соответствующей минимуму энергозатрат Q . При этом, вектор-функция управлений должна принадлежать области допустимых значений в n -мерном пространстве Ω_U , то есть $U(t) \in \Omega_U$ при $t \in [t_0, T]$. Вектор-функция $X(t)$ должна принадлежать области Ω_X , то есть $X(t) \in \Omega_X$.

Критерий оптимальности представляет собой функционал вида:

$$Q = \int_{t_0}^T f\{X(t), U(t)\} dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

Управления $U(t)$ соответствующие минимуму энергозатрат называются оптимальными и обозначаются $U^*(t)$, а соответствующая траектория движения системы (объекта) обозначается $X^*(t)$.

Реализация оптимальной траектории $X^*(t)$ на практике сильно осложняется рядом обстоятельств, в том числе:

- невозможность установить объект управления в заданное начальное состояние;
- невозможность точной реализации оптимальных управляющих воздействий $U^*(t)$ из-за отклонений в работе исполнительных устройств (двигателей ЛА);
- невозможность точного прогноза контролируемых внешних условий, а также влияния неконтролируемых возмущений на работу системы (объекта) и неточности его математической модели [1].

Указанные обстоятельства вызывают необходимость постановки и решения (кроме задачи определения оптимальной траектории) дополнительной важной задачи коррекции исходной оптимальной траектории и управляющих воздействий в процессе функционирования технического объекта на интервале времени $[t_0, T]$. Тем самым исходная задача оптимального управления декомпозируется на две последовательно решаемые подзадачи:

- определение оптимальных управлений $U^*(t)$ и соответствующей им траектории движения объекта $X^*(t)$;
- определение, в режиме реального времени, корректирующих воздействий $\Delta U(t)$ с целью реализации оптимальной траектории в условиях влияния неконтролируемых факторов.

Применительно к управлению движением летательного аппарата Лётов А.М. назвал первую подзадачу задачей программирования оптимальной траектории движения аппарата, а вторую подзадачу – задачей синтеза автомата стабилизирующего движение аппарата вдоль оптимальной траектории.

Утверждение 1. Понятие «движение», применяемое в работах Ляпунова А.М., Лётова А.М. и других учёных требует уточнения его трактовки в отношении систем управления технологическими объектами (агрегатами, линиями, нагревательными и плавильными печами, неподвижными машинами, станками и т.п.). Для технологических объектов

«движение» целесообразно рассматривать как изменение во времени их переменных состояния, выходных переменных, возмущающих и управляющих воздействий. То есть считать, что пространственные координаты таких объектов не изменяются во времени.

Утверждение 2. В качестве номинальной (рациональной) программы управления может быть использовано не только оптимальное управление $U^*(t)$, но и другие управления, удовлетворяющие ограничительным условиям Ω_U, Ω_X . В частном случае в качестве программной траектории $X^*(t)$ может быть рассмотрен вариант $X^*(t)=const$, то есть рассмотрена задача стабилизации состояний и выходных переменных объекта управления.

Утверждение 3. Любое программное движение $\{U^*(t), X^*(t)\}$ независимо от его оптимальности или допустимости называется невозмущённым движением, которому соответствует частное решение уравнений (1). Возмущенное движение характеризуется отклонениями от невозмущённого движения и описывается переменными $X(t) = X^*(t) + \Delta X(t)$, $U(t) = U^*(t) + \Delta U(t)$, где:

- $X^*(t)$, $U^*(t)$ – номинальная траектория и программа управления;
- $\Delta X(t)$, $\Delta U(t)$ – отклонения от номинальной траектории и программы управления.

2. О развитии концепции невозмущенного-возмущённого движения

В работах [7, 8, 9, 10] отмечена несостоятельность принципа «невозмущенного-возмущенного движения» Ляпунова-Летова в условиях действия больших возмущений, особенно в задачах терминального управления. Предложена альтернативная концепция «гибких кинематических траекторий t_0 движения», (ГТД – концепция), которая является развитием НВД – концепции. Суть обновленной концепции состоит в определении прогнозного движения объекта от текущего до терминального момента, в изменении программы управления для достижения объектом заданного конечного состояния. Этими многократно повторяющимися действиями достигается компенсация неизбежно возникающих в реальных условиях возмущений. Другими словами, прогнозируемое движение объекта к терминальной цели и программа управления на отрезке времени от текущего момента до момента $t=T$ (в отличие от классической НВД-концепции) регулярно обновляется (корректируется, уточняется).

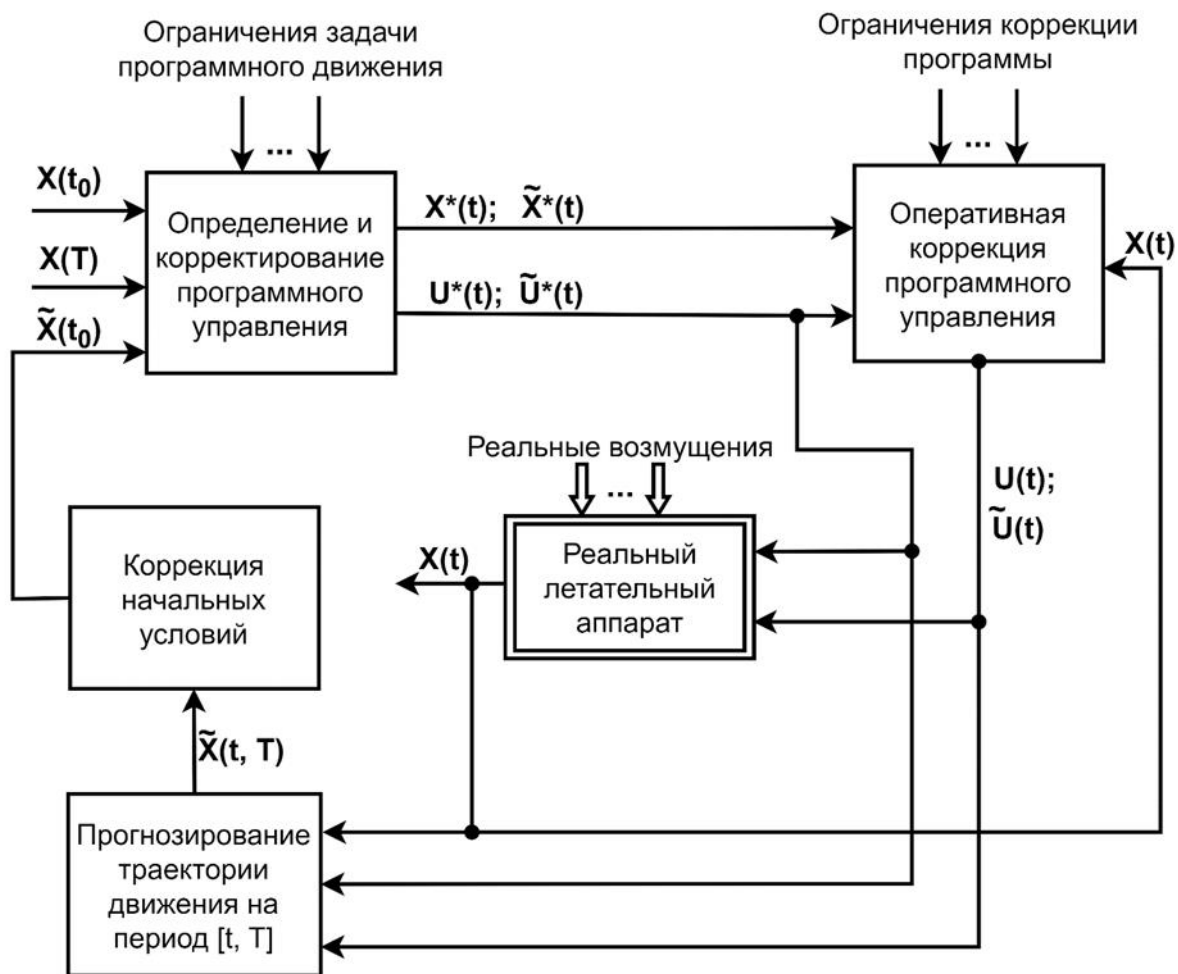
К настоящему времени изучены три способа обновления программной траектории и программы управления [7, 9]:

- разбиение процесса программного управления на интервале $[t_0, T]$ на несколько циклов и расчет по истечению каждого цикла, обновленной программы управления;
- переход на обновленную программу управления в случаях, когда отклонение от текущей программной траектории движения превышает допустимый предел;
- обновление программы управления выполняется для текущего состояния объекта по принципу размораживания начальных условий, [10], то есть замены начальных условий текущими условиями.

Алгоритмическая схема реализации ГТД-концепции показана на рисунке 2 [11].

3. Применение концепции Ляпунова-Летова для создания систем автоматизации технологических процессов в черной металлургии

В СибГИУ в период 1975 по 2000 год при кафедре автоматизации металлургического производства (сегодня- кафедра автоматизации и информационных систем) успешно функционировала научная школа профессора Авдеева В.П., в рамках которой были подготовлены и защищены 54 кандидатских 9 докторских научных диссертаций. Из них в 17 диссертациях ставились и по-новому решались задачи автоматизированного управления сложными металлургическими агрегатами с опорой на концепцию программно-возмущенного (программно-стабилизирующего) управления Ляпунова-Летова.

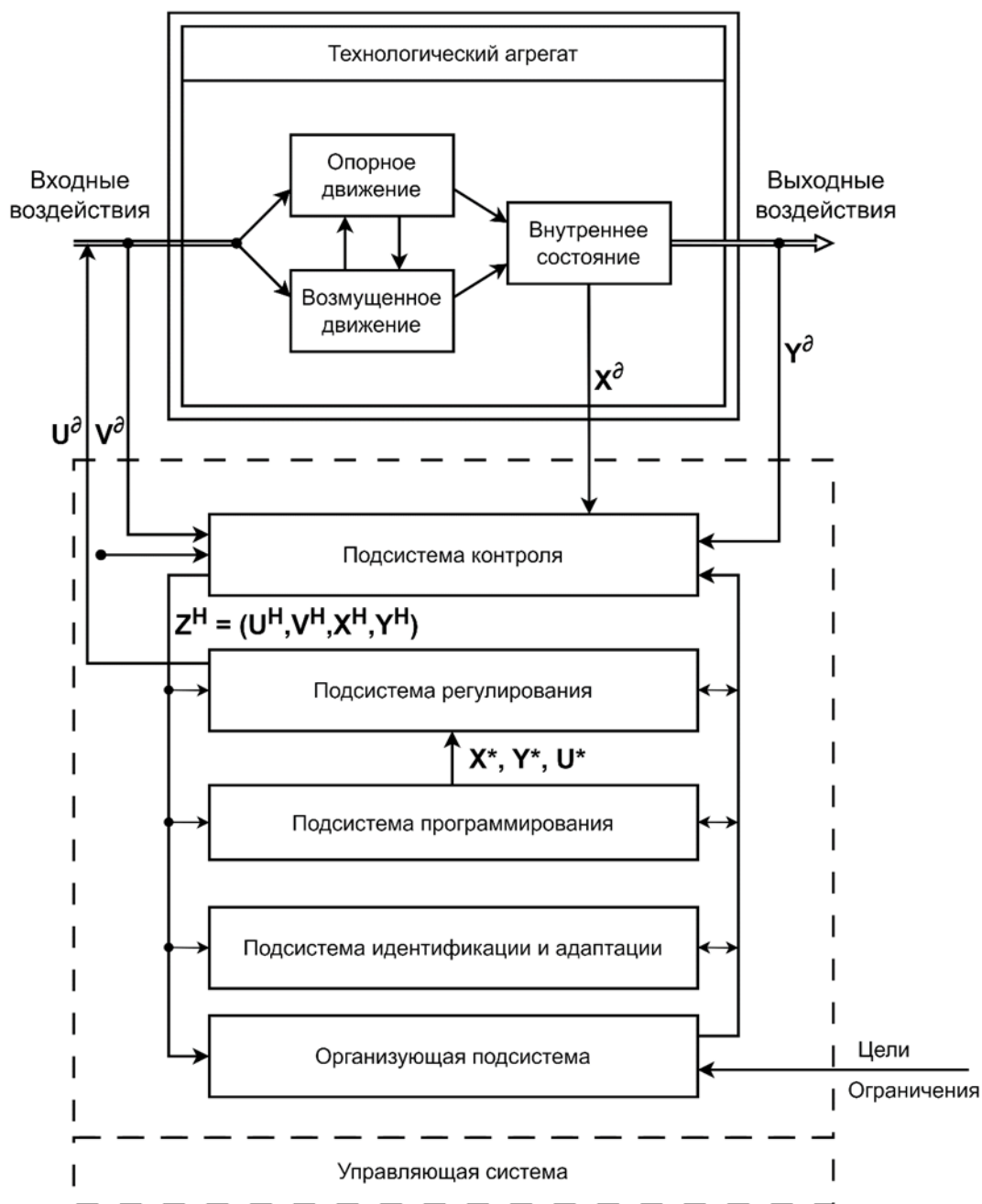


$X(t_0)$, $\tilde{X}(t_0)$ – исходный и скорректированный векторы параметров состояния объекта в момент начала программы управления;
 $X(T)$ – вектор параметров состояния в конечный момент T ;
 $X^*(t)$, $U^*(t)$; $\tilde{X}^*(t)$, $\tilde{U}^*(t)$ – вектор-функции расчётной траектории и программы управления на интервале времени $[t_0, T]$, а так же скорректированные функции траектории и программы управления на интервале $[t, T]$, где t – текущий момент времени;
 $\Delta U(t, T)$, $\Delta \tilde{U}(t, T)$ – корректирующие воздействия для исходной и корректируемой программы управления;
 $X(t)$ – вектор измеренных параметров состояния в момент t ;
 $\tilde{X}(t)$ – прогнозируемая траектория движения на интервале $[t, T]$.

Рисунок 2 – Схема реализации концепции гибких траекторий движения

На рисунке 3 представлена функциональная схема управления сложным технологическим объектом, декомпозиция управляющей системы которой выполнена на базе концепции Ляпунова-Летова [12, 13]. Ход технологического процесса, протекающего в металлургическом агрегате представлен в виде композиции двух составляющих, -- опорного движения и возмущенного движения. Соответственно этому сформирована функциональная структура управляющей системы, ведущими (базовыми) подсистемами которой является две подсистемы, – программирующая и регулирующая. Данная структура положена в основу разработанных (с участием сотрудников кафедры автоматизации и информационных систем СибГИУ) систем автоматизации доменных печей, сталеплавильных

агрегатов (конверторов, дуговых сталеплавильных печей), коксовых батарей, агломерационных машин АО «Евраз ЗСМК».



U^d, V^d, X^d, Y^d – действительные параметры управлений, входов, состояний и выходов объекта;

$Z^H = (U^H, V^H, X^H, Y^H)$ – векторы натуральных сигналов формируемых системой контроля;

X^*, Y^*, U^* -- векторы задающих (программных) состояний, выходов и управлений объекта.

Рисунок 3 – Функциональная схема управления сложным технологическим объектом

4. О применимости концепции Ляпунова-Летова в организационных системах управления

Организационные системы, как объект управления, гораздо более сложны по сравнению с техническими (технологическими) объектами не только потому, что они включают в себя технические объекты (агрегаты, машины, механизмы, транспорт, станки и т.п), но и потому что они «представляют объединение людей, совместно реализующих некоторую цель» [14].

Декомпозиция проблемы организационного управления на составные задачи или функции управления изучается многие десятилетия. В частности, функции управления организациями формулируются и уточняются, начиная от Анри Файоля, - основателя менеджмента, до настоящего времени. В 1916 году он выделил следующие основные функции: планирование, организация, мотивация, контроль, координация. Современные исследователи подтверждают из них первые четыре функции как основные, которые объединены между собой связующими процессами коммуникации и принятия решений [15]. Подчеркнем, что математически и логически строго обоснования данной схемы декомпозиции не существует.

Сопоставляя концептуальную схему Ляпунова-Летова (рисунок 1) а также усовершенствованную схему их последователей (рисунок 2) с концепцией А. Файоля важно отметить следующие:

1) концепция Ляпунова-Летова, а также ее современные трактовки принципиально отличаются от эвристической декомпозиционной схемы А. Файоля, что можно объяснить отличием свойств и особенностей технических и организационных объектов управления. Определяющим отличием является наличие активности у организационных объектов как «способности к самостоятельному выбору определенных целей и действий» и отсутствие таковой у технических объектов [14, 16];

2) в перечне функций организационного управления А. Файоля присутствуют компоненты подобные функциям программированного и стабилизирующего управления техническим объектом. Это функции планирования и контроля. Планирование есть процесс установления целей организации, определения средств их достижения, а также последовательности действий и сроков их реализации. Контроль есть процесс оценки текущих результатов действий организации и внесения необходимых корректирующих мер.

Из анализа сходств и различий концепций управления, указанных в пунктах 1),2) очевиден следующий вывод: необходимо математически строго сформулировать и решить сложную задачу декомпозиции проблемы управления организационной системой. Такие вопросы пока еще не изучены в рамках современной теории управления организационными системами. При их рассмотрении целесообразно учесть опыт формализации и декомпозиции задачи оптимального управления летательными аппаратами.

Библиографический список

1. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения (докторская диссертация, 1892.). – 2-ое изд. Кириллов: ОНТИ НКТП СССР, 1935. – 389с.
2. Храмов, А.А. Возмущенное движение летательных аппаратов: учеб. пособие / А.А. Храмов ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева. - Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2022. – 64 с.
3. Летов А. М. Динамика полета и управление [Текст] /А.М. Лётов. - Москва : Наука, 1969. - 359 с.
4. Тихонов А.Н. Дифференциальные уравнения / А.Н. Тихонов., А.Б. Васильева., А.Г. Свешников.-М.: Наука, 1986.-232с.
5. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов /Л.С. Понтрягин. – М.: Наука, 1976. – 392с.

6. Заболотнов Ю.М. Оптимальное управление непрерывными динамическими системами: учеб. пособие / Ю.М. Заболотнов. - Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2016.-- 148 с.
7. Теряев Е.Д., Концепция гибких кинематических траекторий в задачах терминального управления подвижными объектами / Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов, А.Б. Филимонов, К.В. Петрин. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 7 -- 15.
8. Сергеев А.А. Управление маневром беспилотного летательного аппарата при посадке на подвижную платформу методом «гибких» кинематических траекторий. / А.А. Сергеев, Н.Б. Филимонов. // Известия вузов. Приборостроение, 2020. Т.63, №9, С.808-811.
9. Филимонов А.Б. Методы «гибких» траекторий в задачах терминального управления вертикальными маневрами летательных аппаратов. / А. Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов. // В кн. Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники. Под ред. С.Н. Васильева. – М.: Машиностроение, 2015. – С.51 – 110.
10. Ли Е.К. Исследование точности алгоритма терминального управления посадкой спускаемого аппарата на поверхность Луны / Е.К. Ли, А.В. Фомичев А.В. // Эл. Журнал «Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2017. №04. С. 113-128.
11. Гончаревский В.С. Корректирующее управление взаимным маневром космических аппаратов/ В.С. Гончаревский // Информация и космос, 2022. №2, с. 200-206.
12. Авдеев В.П. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей : Учеб. пособие / В. П. Авдеев, Т. М. Даниелян, П. Г. Белоусов. // Сибирский металлургический институт. – Новокузнецк. 1984, -- 88с.
13. Авдеев В.П. автоматизированные системы с многовариантной структурой: Учеб. пособие / Авдеев В. П., А.Г. Дьячко, Л. П. Мышляев, Е.Н. Тараборина. // Сибирский металлургический институт. – Новокузнецк. 1991, -- 88 с.
14. Новикова Д.А. теория управления организационными системами. Изд. 4-е, испр. и доп. М.: ЛЕНАНД, 2022. – 500с
15. Теория управления : учебник для студентов высших учебных заведений по специальности «Государственное и муниципальное управление» / [Ю.В. Васильев, В.Н. Парахина, Л.И. Ушвицкий и др.] ; под ред. Ю.В. Васильева, В.Н. Парахиной, Л.И. Ушвицкого. - Изд. 2-е, доп. - Москва : Финансы и статистика, 2008. – 606с.
16. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем [Текст] / В.Н. Бурков ; Ин-т проблем управления. - Москва : Наука, 1977. - 255 с

УДК 004.896

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ И РАСПОЗНАВАНИИ ВЫБРОСОВ ГАЗО-ШЛАКО-МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЭМУЛЬСИИ ИЗ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Трофимов В.Б.

*Университет науки и технологий МИСИС
г. Москва, Россия, trofimov_vbt@mail.ru*

***Аннотация.** В работе рассматривается схема интеллектуальной информационно-управляющей системы кислородного конвертера. Описана задача распознавания и прогнозирования выбросов газо-шлако-металлической эмульсии в режиме реального времени на основе искусственных нейронных сетей по признакам $\{CO, CO/CO_2, CO/(CO+CO_2), CO_2, N_2, Ar\}$ конвертерного отходящего газа. Предложены соответствующие процедуры.*