

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА  
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ им.акад.А.И.ГУСЕЙНОВА**

---

*На правах рукописи*

**МУТАЛЛИМ МИРЗААХМЕД оглы МУТАЛЛИМОВ**

**ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ОПТИМИЗАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

1203.01 – Компьютерные науки

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора наук по технике

**БАКУ – 2013**

Диссертационная работа выполнена в Институте Прикладной Математики Бакинского Государственного Университета

**Научный консультант:**

доктор физико-математических наук, академик

**Ф.А.Алиев**

**Официальные оппоненты:**

- Доктор технических наук, профессор

**Ф.М.Абдуллаев**

- Доктор физико-математических наук, профессор

**В.И.Цурков**

- Доктор технических наук, профессор

**В.Г.Мусаев**

**Ведущая организация:** Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, кафедра "Компьютерной инженерии" радиофизического факультета

Защита состоится 25 июня 2013 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании Диссертационного Совета Д 01.121 при Институте Кибернетики Национальной Академии Наук Азербайджана.

Адрес: AZ1141, г.Баку, ул.Б.Вагабзаде, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Кибернетики НАН Азербайджана.

Автореферат разослан 24 мая 2013 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета D01.121

кандидат физико-математических наук

**А.Б.Пашаев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Динамические системы, которые имеют механическую природу, всегда были предметом исследования. Это связано с тем, что уравнения механики достаточно хорошо описывают движения различных динамических объектов. Поскольку механические системы имеют существенную специфику, проблема управления таких систем является одной из центральных задач теории и практики управления. Не менее актуальной является другая задача - проблема распознавания технического состояния механических систем. Одним из направлений повышения качества обслуживания современных механических систем оборудования является разработка методов и средств для своевременной диагностики, обнаружения и предупреждения неисправностей технического оборудования, возникающих в процессе их эксплуатации.

Создание и дальнейшее развитие теорий оптимизации и оптимального управления послужили основой их полномасштабного применения ко многим практическим задачам, начиная от сельского хозяйства до тяжелой промышленности. Постановкам и теоретическим исследованиям таких задач оптимального управления посвящены работы М.Аоки, М.Атанса, Р.Беллмана, Ф.П.Васильева, Р.Габасова, Н.Н.Красовского, Н.Н.Моисеева, Л.С.Понтрягина, Р.Рокафеллара и др. Задачи оптимизации и оптимального управления механических систем и технологических процессов рассматривались в работах А.А.Абдуллаева, Ф.М.Абдуллаева, В.Б.Ларина, В.И.Матюхина, И.Р.Эфендиева, Т.Г.Рзаева, Ф.Л.Черноусько, А.В.Юркова и др. Вопросам существования решений задач математического программирования, а также разработке методов решения оптимального управления посвящены работы Ф.А.Алиева, А.Д.Искендерова, Ф.М.Кирилловой, Г.Ф. Кулиева, В.Б.Ларина, К.А.Лурье, К.Б.Мансимова, Т.К.Меликова, Э.Полака, М.А.Садыгова, Э.П.Сейджа, В.И.Цуркова, М.А.Ягубова и др. В последнее время широко исследуются такие современные задачи, как поиск оптимальной формы области, а также задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями. Результаты по задачам оптимизации формы получены в работах Н.Б.Баничука, Ю.С.Гасымова, Т.Карлемана, А.А.Нифтиева, а по задачам оптимального управления с многоточечными краевыми условиями в

работах К.Р.Айдазаде, Л.Т.Ащепкова, А.Брайсона, О.О.Васильевой, В.В.Величенко, Я.А.Шарифова и др.

При решении задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями возникает необходимость решения краевой задачи с многоточечными краевыми условиями для обыкновенных дифференциальных уравнений.

Исследования в этом направлении велись, в основном, начиная с 1960 года. Основные результаты по этим задачам получены в работах А.А.Абрамова, А.Ю.Левина, К.Мощинского, В.Е.Шаманского и др.

Отметим, что нахождение решений для таких граничных задач можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, с помощью которых рассматриваемая краевая задача решается непосредственно. К таким методам относятся проекционные методы типа Бубнова-Галеркина, проекционно-итеративный метод, метод последовательных приближений, метод повышения размерности исходных задач и др. Ко второй группе относятся методы стрельбы, прогонки, редукции и др., с помощью которых первоначальная задача сводится к более простой задаче, например к задаче Коши.

Теоретическое исследование и разработка методов решения задач оптимального управления с многоточечными краевыми условиями позволили решать задачи оптимизации для ряда механических систем. Так, например, теоретические результаты в этой области могут быть применены для решения таких задач, как задача управления космическими объектами, оптимизации производственных процессов, управления движением шагающего аппарата, управления штанго-насосными установками и т.д.

Известно, что при эксплуатации нефтяных скважин широкое распространение получили применение глубинных штанго-насосных установок, а также газлифтный метод. Отметим, что разработке моделей и теоретическому исследованию посвящены работы А.Н.Аббасова, А.Н.Адолина, М.К.Багирова, Н.Д.Дрэготеску, А.С.Вирновского, М.А.Гулиева, М.А.Гусейнзаде, А.Х.Мирзаджанзаде, Ш.С.Мовламова, И.М.Муравьева, И.А.Чарного, В.И.Шурова и др. А в работах А.А.Абдуллаева, М.А.Джамалбекова, М.Х.Ильсова, Н.Б.Нуриева, С.И.Юсифова и др. проводились исследования газлифтного процесса.

Не менее актуальной задачей является обеспечение надежной работы технических систем разного назначения, для чего необходимо выполнять функциональный контроль этих систем, который в общем

случае включает в себе классификацию и диагностику текущего технического состояния системы, а также прогнозирование ее состояния.

Во многих случаях решение проблемы диагностирования объектов связано с распознаванием полученных данных, в том числе, в виде рисунков. Так, в случае диагностики неисправностей штанго-насосных установок основной задачей является расшифровка динамограмм, которые получаются в результате динамометрирования. По этим полученным динамограммам можно определить различные неисправности штанго-насосной установки, не останавливая работу насоса. Для чтения различных динамограмм используются различные способы.

Разнообразие, большой объем и противоречивость различной диагностической информации выводят на передний план проблему поиска таких систем, которые способны к ее переработке. Решение этой комплексной задачи тесно связано с новыми информационными технологиями, важное место среди которых занимают методы распознавания и категоризации образов.

Нейронные сети – мощный, и на сегодня пожалуй, наилучший метод для решения задач распознавания образов в ситуациях, когда в экспериментальных данных отсутствуют значительные фрагменты информации, а имеющаяся информация предельно зашумлена. Высокая степень параллельности, допускаемая при реализации нейросистем, обеспечивает обработку недоступных оператору объемов информации за время, меньшее или сравнимое с допустимым временем измерений. Построению, исследованию и применению нейронных сетей посвящены работы А.Н.Горбаня, М.Минского, У.Маккалоха, Ф.Розенблатта, Ф.Уоссермена, Д.Хейбба, Д.Хопфилда и др. Математическое обоснование нейронных сетей даны в работах В.И.Арнольда, А.Н. Колмогорова, М.Н.Стоуна и др.

Развитие теории нейронных сетей позволяет их применять для диагностировании различных технических систем. Эту методику можно использовать и для определения неисправностей, возникающих в работе штанго-насосных установок.

В настоящее время ведутся интенсивные исследовательские работы по созданию методов и вычислительных алгоритмов для решения задач оптимизации и диагностики ряда механических систем. Такие методы могут быть чисто аналитическими или дискретными, могут быть и численно-аналитическими. Отметим, что при численном

решении сложных задач механических систем предварительное аналитическое исследование отдельных локальных свойств рассматриваемой проблемы имеет важное значение и приносит определенную пользу. Таким образом, применение численно-аналитических методов имеет определенное преимущество как перед чисто аналитическими, так и простыми численными методами. И настоящая диссертация посвящена разработке численно-аналитических методов и вычислительных алгоритмов для решения задач оптимизации и диагностики ряда механических систем, встречающихся при эксплуатации нефтяных скважин.

**Цель работы.** Цель диссертационной работы состоит в решении следующих основных задач:

- разработка математической модели работы штанго-насосных установок при эксплуатации нефтяных скважин, которая описывает движение плунжера штанговой скважиной глубинной насосной установки (ШСГНУ) и учитывает продольные колебания и деформации штанга под действием собственного веса;

- постановка задачи оптимального управления движением плунжера в штанго-насосных установках на основе разработанной модели;

- постановка задачи оптимального управления газлифтного процесса;

- численно-аналитический метод, повышающий размерность исходной задачи и вычислительный алгоритм решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями;

- численно-аналитический метод прогонки и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями;

- численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления эксплуатации нефтяных месторождений газлифтным способом;

- численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимальной стабилизации движения плунжера штанго-насосной установки;

- численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимальной стабилизации газлифтной эксплуатации;

- метод диагностики неисправностей штанго-насосных установок в полуавтоматическом режиме;

– применение нейронных сетей к диагностике неисправностей штанго-насосных установок.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы современные методы теории математического моделирования, оптимального управления, обыкновенных дифференциальных уравнений, математической физики, вычислительной математики, нейронных сетей.

**Научная новизна:**

- построена и обоснована математическая модель работы штанго-насосной установки, в которой периодическое движение плунжера ШСГНУ рассматривается в четырех фазах, где учитывается продольные колебания и деформации штанга. Такая модель позволяет впервые поставить различные задачи оптимального управления;

- разработаны новый численно-аналитический метод, повышающий размерность исходной задачи и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями;

- разработаны новый численно-аналитический метод прогонки и соответствующий вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями, возникающие, в частности, при управлении ШСГНУ;

- разработаны новый численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления газлифтной эксплуатации нефтяных скважин;

- разработаны численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимальной стабилизации работы штанго-насосной установки около соответствующих программных траектории и управления;

- разработаны численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимальной стабилизации газлифтной эксплуатации около соответствующих программных траектории и управления;

- на основе математической модели, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных, получены аналитические формулы для построения теоретических динамограмм.

- создана база данных и разработан метод определения неисправностей штанго-насосных установок в полуавтоматическом режиме;

- на основе нейронных сетей WTA разработан новый метод диагностики для определения неисправностей штанго-насосных установок.

**Теоретическая и практическая ценность.** Построена математическая модель, которая учитывает продольные колебания штанг и описывает движение плунжера в штанго-насосных установках. Разработаны численно-аналитические методы решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями, а также задачи оптимальной стабилизации. Построены эффективные вычислительные алгоритмы, составлены программы для решения рассмотренных задач. Разработаны методы диагностики неисправностей штанго-насосных установок в полуавтоматическом режиме и с использованием нейронных сетей. Предложенные в работе подходы применимы к широкому классу разнообразных задач и результаты работы могут быть использованы также в изучении некоторых задач управлений механическими системами, в том числе при эксплуатации нефтяных месторождений штанго-насосными установками и газлифтным способом.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- Международная Конференция «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула, 2003.
- “Хəзərneftqazyataq-2004” Elmi-təcrübi konfransı, Bakı-2004.
- The 1-st International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2005), Baku, 2005.
- Международная конференция, посвященная 50-летию со дня рождения чл.корр. НАНА, профессора И.Т.Мамедова, Баку, 2005.
- AMEA-nın həqiqi üzvü, prof. M.L.Rəsulovun 90 illiyinə həsr olunmuş “Riyazi Fizikanın Üsulları” elmi konfransı, Bakı, 2006.
- XII Международная конференция по математике и механике, посвященной 70 летнему юбилею чл.корр. НАН Азербайджана, проф.Б.А.Искендерова. Баку, 2006.
- XII International Conference On Automatic Control. Vinnytsia, 2006.
- XV Международная Конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Алушта, 2007.



- Научная Конференция, посвященная 90-летию юбилею чл. корр. НАН Азербайджана, профессора Г.Т.Ахмедова. Баку, 2007.
- “Riyaziyyatın tətbiqi məsələləri və yeni informasiya texnologiyaları” respublika elmi konfransı, Sumqayıt, 2007.
- II Türk Dünyası Matematik Simpoziumu, 4-7 iyul 2007, Sakarya.
- The 2-nd International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2008), Baku, 2008.
- Научная конференция, посвященная 85-летию Г.Алиева, Баку, 2008.
- XV Международная Конференция по Автоматическому Управлению. Одесса, 2008.
- The Third Congress of the Turkic World Mathematical Society. Almaty, 2009.
- BDU-nun 90 illik yubileyinə həsr olunmuş Beynəlxalq elmi konfrans, Bakı, 2009.
- XVI Международная Конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Алушта, 2009.
- Международная Конференция, посвященная 80-летию юбилею академика Ф.М.Максудова, Баку, 2010.
- The 3-rd International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2011), Bilkent University, Ankara, Turkey, 2011.

**Объем и структура работы.** Диссертация изложена на 248 страницах, состоит из списка обозначений, введения, пяти глав, включающих 18 параграфов, приложения и списка литературы, содержащего 181 наименование.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-52].

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теперь вкратце опишем содержание диссертации. Она состоит из пяти глав. Первая глава состоит из четырех параграфов и посвящена постановкам задач оптимального управления и диагностики, возникающие при эксплуатации нефтяных скважин различными способами.

В первом параграфе первой главы рассматриваются математические модели, которые описывают продольные колебания плунжера в скважинно-глубинно-насосных установках. Известно, что глубинно-насосная установка нефтяных скважин состоит из труб и колонны штанг, на конце которых крепится плунжер. Внутри этих труб перемещается колонна штанг и перекачиваемая нефть. Насос можно рассматривать как систему трех коаксиальных цилиндров: первый цилиндр колонны насосных труб, второй - насосных штанг и, наконец, третий цилиндр колонна жидкости. Насосные штанги, и трубы во время пребывания их в скважине испытывают силу собственного веса, распределенную по длине труб и штанг, и находятся в деформированном состоянии. Такое нагружение называется статическим.

Собственный вес колонны штанг и плунжера вызывает центральное растяжение, и она растягивается. Вес штанга и плунжера можно рассматривать как продольную внешнюю нагрузку, распределенную вдоль оси колонны штанг и направленная вниз.

Обычно, вместо реальной системы рассматривается упрощенная модель типа вынужденного колебательного движения груза, подвешенного к вертикальной пружине. Эта модель позволяет с приемлемой для практики точностью изучить исследуемый процесс. В этом случае, колонну насосных штанг будем представлять как пружину очень большой длины. В верхней части она подвержена периодическому импульсу вследствие движение балансира. Иными словами, рассматривается вынужденные колебания плунжера, подвешенного к вертикальной штанге, верхний конец которой движется почти по гармоническому, т.е. по синусоидальному закону.

Предложенная нами модель отличается от стандартной модели тем, что в нашем случае полный период  $T$ , т.е. отрезок  $[0, T]$  разбивается на 4 части, в каждой из которых решается задача Коши, причем на I и III этапах рассматриваются уравнения первого порядка, а на II и IV этапах - уравнения второго порядка.

Динамика работы насосных штанг сложна и происходит в четыре этапа. На первом этапе штанг под действием собственного веса и веса плунжера деформируется и находится в растянутом состоянии. Собственный вес штанга и висячий на штанге плунжер растягивает ее на величину -  $\lambda_0$  (статическое удлинение штанга). В начале хода вверх выкидной клапан закрывается, масса столба жидкости

передается на плунжер и штанг получает упругое удлинение. В результате точка подвеса штанга перемещается вверх и штанг удлиняется на величину  $\lambda_1$ . На втором этапе происходит движение штанга с плунжером вверх. На третьем этапе в верхней точке снимается вес столба жидкости, и длина штанга сокращается на величину  $\lambda_1$ .

В начале хода вниз штанг сокращается еще на величину  $\lambda_0$  т.е. до своей первоначальной длины. На четвертом этапе происходит движение вниз. На всех этих этапах происходят продольные колебания колонны насосных штанг приблизительно по синусоидальному закону. Происходит периодическое изменение напряжений и деформаций по гармоничному закону на первом и третьем этапах, вместе взятыми.

На втором и четвертом этапах происходит движение вверх-вниз штанга с плунжером подобно вынужденным колебаниям груза, подвешенного к вертикальной пружине, верхний конец которой колеблется по синусоидальному закону. Таким образом, формальную комбинацию первого-третьего и второго-четвертого этапов движения штанга с плунжером можно представить в виде двух колебательных движений груза, подвешенного к вертикальной пружине.

Отметим, что задача вынужденных колебаний плунжера с учетом силы сопротивления сводится к решению следующего нелинейного уравнения.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx = f(t). \quad (1)$$

Здесь

$$M = \frac{1}{3} m_{ум} + m_{пл} + m_{жс}, \quad B = b/M, \quad K = \frac{c}{M},$$

$$m_{жс} = (F_{пл} - f_{ум})x(t)\gamma,$$

$L$  -длина штанга;  $F_{nl}$ ,  $f_{um}$  -площади поперечного сечения плунжера и штанги по металлу ( $M^2$ ) соответственно,  $\gamma$  -плотность металла.

В общем виде интегрирование и нахождение аналитического решения нелинейного уравнения (1) не представляется возможным. Но, учитывая, что в основном встречающиеся на практике возмущающие силы носят периодический характер, представляет значительный интерес построение приближенного периодического решения и постановка задачи оптимального управления.

Рассмотрим вынужденные колебания плунжера без учета  $m_{жс}$ , т.е. при  $m_{жс}=0$ . Если предположить, что на первом и третьем этапах ускорение отсутствует, получим:

$$b \frac{dx_1}{dt} + kx_1 = f_1(t), \quad x_1|_{t=0} = L_0 + \lambda_0, \quad x_1 \in [0, y_1(\tau_1)], \quad t \in [0, \tau_1]. \quad (2)$$

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b \frac{dx_2}{dt} + kx_2 = f_2(t), \quad x_2|_{t=\tau_1} = x_1(\tau_1), \quad (3)$$

$$\left. \frac{dx_2}{dt} \right|_{t=\tau_1} = x'_1(\tau_1), \quad x_2 \in [x_2(\tau_1), x_2(\tau_2)], \quad t \in [\tau_1, \tau_2].$$

$$b \frac{dx_3}{dt} + kx_3 = f_3(t), \quad (4)$$

$$x_3|_{t=\tau_2} = x_2(\tau_2), \quad x_3 \in [x_3(\tau_2), x_3(\tau_3)], \quad t \in [\tau_2, \tau_3].$$

$$m \frac{d^2 x_4}{dt^2} + b \frac{dx_4}{dt} + kx_4 = f_4(t), \quad (5)$$

$$x_4|_{t=\tau_3} = x_3(\tau_3), \quad \left. \frac{dx_4}{dt} \right|_{t=\tau_3} = x'_3(\tau_3), \quad x_4 \in [x_4(\tau_3), x_4(\tau_4)], \quad t \in [\tau_3, T].$$

$$L = L_0 + \lambda_0 + \lambda_1, \quad m = \frac{1}{3} m_{um} + m_{nl}.$$

Как показали численные результаты решения задач стандартной (1) и предложенной нами модели (2-5) имеют гармонический характер и имеют разность фаз. В результате численных расчетов мы получили, что разность фаз равна  $\frac{L_0}{C}$ . С учетом этой разности графики этих решений практически совпадают.

Во втором параграфе первой главы приводятся математические постановки задач движения жидкостей, газов и газожидкостных смесей в трубопроводах в виде систем нелинейных уравнений в частных производных гиперболического типа применительно к задачам добычи нефти из газлифтных скважин. Принимая некоторые реальные допущения, часто возникающие на практике, рассматриваются математические модели, на основе которых ставятся задачи оптимального управления, которые в дальнейшем могут использоваться при построении программных траекторий и управлений, являющихся основной частью построения соответствующих регуляторов для стабилизации давления или расхода закачиваемого газа. Отметим, что математическая модель работы газлифтной скважины для пузырьковых газожидкостных структур при допустимых предположениях описывается следующей линейной системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{c^2}{F} \frac{\partial Q}{\partial z} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} = -F \frac{\partial P}{\partial z} - 2aQ \end{cases} \quad t \geq 0, \quad z \in [0, 2L] \quad (6)$$

В третьем параграфе первой главы сначала на базе классической модели движения плунжера в штанго-насосных установках рассматривается задача оптимального управления. Здесь движение плунжера описывается уравнением

$$my'' + by' + ky = f(t),$$

а краевые условия задаются следующими равенствами

$$\begin{aligned} y(t_0) &= y_0 & y(\tau) &= y_\tau & y(T) &= y_T \\ y'(\tau) &= y'_\tau & y'(t_0) &= y'_0 & y'(T) &= y'_T. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку здесь  $f(t)$  внешняя сила, воздействующая на верхний конец штанга, ее можно использовать как управляющее воздействие. Таким образом, задавая внешнюю силу, мы можем управлять движением плунжера штанго-насосных установок. Отметим, что в этой задаче имеет смысл минимизировать энергию. В конкретном случае ставится задача минимизации нормы, т.е. отыскивается такое управляющее воздействие  $f(t)$ , для которого квадратичный функционал

$$J = c \int_{t_0}^T f^2(t) dt \quad (8)$$

принимает минимальное значение. И, используя соответствующее преобразование, получим следующую задачу оптимального управления с трехточечными краевыми условиями

$$x' = Fx + Gu + v, \quad (9)$$

$$\Phi_1 x(t_0) + \Phi_2 X(\tau) + \Phi_3 X(T) = q, \quad (10)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \{x'(t)Qx(t) + u'(t)Cu(t)\} dt \rightarrow \min. \quad (11)$$

В дальнейшем эту задачу можно свести к стандартной задаче оптимального управления с многоточечными краевыми условиями.

Отметим, что при использовании компьютерной техники для реализации алгоритмов решения оптимального управления целесообразно описывать движение плунжера штанго-насосных установок не дифференциальными уравнениями, а соответствующими разностными уравнениями. В этом случае функционал (11) приводится к функционалу

$$J = c \sum_{i=1}^n f^2(i), \quad (12)$$

а соответствующая задача оптимального управления будет иметь следующий вид:

$$x(i+1) = \psi x(i) + \Gamma u(i) \quad (13)$$

$$\Phi_1 x(0) + \Phi_2 X(l) + \Phi_3 X(N) = q \quad (14)$$

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N x'(i) Q x(i) + u'(i) C u(i) \rightarrow \min \quad (15)$$

В четвертом параграфе рассматривается задача диагностики штанго-насосных установок при эксплуатации нефтяных скважин. Поскольку при эксплуатации нефтяных скважин с малым дебитом наиболее широкое распространение получили штанго-насосные установки, контроль работы насоса, а также своевременное выявление ситуаций, которые снижают эффективность работы штанго-насосной установки, а также диагностика неисправностей штанго-насосной установки имеют первостепенное значение. Обычно задача диагностики штанго-насосной установки сводится к расшифровке динамограмм работы глубинного насоса. Отметим, что каждая неисправность, возникающая в глубинных насосах, а также другие нарушения (песок, газ, парафин и др.) в режиме работы насоса приводит к уменьшению нефтеотдачи и, в конечном итоге, может привести к выведению из строя самой скважины. Поэтому контроль режима работы нефтяных скважин, в том числе выявление и диагностика неисправностей глубинных насосов является важной проблемой нефтедобывающей промышленности.

Для диагностирования неисправностей штанго-насосных установок применяются метод динамометрирования, который используется как наиболее эффективный метод оперативного контроля ГШНУ. Этот метод заключается в том, что с помощью динамографа производится запись динамограмм, по которым можно определить различные неполадки в работе насоса, не поднимая его на поверхность земли. При условии соблюдения точности показаний динамографа и

проведения соответствующей расшифровки динамограмм можно получить свыше тридцати различных сведений о работе ГШНУ. Отметим, что изменение нагрузки на полированный шток за время одного хода станка качалки ГШНУ является результатом сложного взаимодействия большого числа различных факторов. Вследствие этого взаимодействия вид записанных динамограмм имеет весьма разнообразные очертания. Хорошо разбирая в сложном взаимодействии этих факторов и умея разбирать характерные особенности, отвечающие влиянию каждого из них, можно правильно расшифровать динамограммы и тем самым, определять неисправности ГШНУ.

Вторая глава диссертации посвящена разработке методов решения оптимального управления с многоточечными краевыми условиями, иными словами построению программных траектории и управления. Здесь предлагается два метода, один из которых является методом решения задачи оптимального управления с повышением размерности исходной задачи, а другой - методом прогонки для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями.

В первом параграфе второй главы описан разработанный метод для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями с повышением размерности исходной задачи. С помощью расширенного функционала получается соответствующее уравнение Эйлера-Лагранжа с соответствующими краевыми условиями. Далее, относительно значений неизвестной функции и множителя в заданных точках получается система алгебраических уравнений. Используя эти значения, определяются программные траектория и управления на всем отрезке времени. Рассматривается следующая задача. Допускается, что процесс описывается уравнением

$$\dot{x} = Fx + Gu \quad t \in [0, T], \quad (16)$$

с многоточечными краевыми условиями

$$\sum_{i=0}^p \Phi_i x(t_i) = q, \quad t_i \in (0, T), \quad (17)$$

где требуется минимизировать функционал



$$J = \frac{1}{2} \int_0^T \{x'Qx + u'Ru\} dt. \quad (18)$$

Соответствующее уравнение Эйлера-Лагранжа получим в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & -M \\ -G & -F' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix}, \quad (19)$$

с условиями

$$\begin{cases} \lambda(t_0) = -\Phi_0' \gamma \\ \lambda(t_i + 0) = \lambda(t_i - 0) - \Phi_i' \gamma \\ \lambda(t_p) = \Phi_p' \gamma \end{cases} \quad i = \overline{1, p-1}. \quad (20)$$

Затем, используя точное решение уравнения (16) и условия (17)  $(t_i, t_{i+1})$ ,  $i = \overline{0, p-1}$  для определения неизвестного вектора

$$z = [x(t_0), \lambda(t_0), x(t_1), \lambda(t_1 - 0), \lambda(t_1 + 0), \dots, x(t_i), \lambda(t_i - 0), \lambda(t_i + 0), \dots, x(t_{p-1}), \lambda(t_{p-1} - 0), \lambda(t_{p-1} + 0), x(t_p), \lambda(t_p), \gamma]$$

получаем систему алгебраических уравнений

$$Az = l \quad (21)$$

где  $x(t), u(t)$  определяются из соотношений:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix} = H^{i+1} \begin{bmatrix} x(t_i) \\ \lambda(t_i + 0) \end{bmatrix}, \quad t \in (t_i, t_{i+1})$$

$$u(t) = -R^{-1}G'\lambda(t).$$

Далее, в этом параграфе рассматривается дискретная задача оптимального управления. Как в непрерывном случае, и здесь решение задачи сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. На самом деле, в данном случае движение описывается уравнением

$$x(i+1) = \psi x(i) + \Gamma u(i), \quad i = \overline{0, p-1}, \quad (22)$$

где решение  $x(i)$  удовлетворяет граничным условиям

$$\sum_{j=0}^l \Phi_j x(i_j) = q, \quad i_0 = 0, \quad i_l = p, \quad j = \overline{1, l-1}. \quad (23)$$

И требуется найти такое управление  $u(i)$ , при котором функционал

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^p x'(i) Q(i) x(i) + u'(i) c(i) u(i) \quad (24)$$

принимает минимальное значение.

Как в непрерывном случае, и здесь получается соответствующее уравнение Эйлера-Лагранжа, которое имеет вид

$$\begin{bmatrix} x(i+1) \\ \lambda(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi & -\Gamma c^{-1} \Gamma' (\psi')^{-1} \\ Q & (\psi')^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(i) \\ \lambda(i) \end{bmatrix}, \quad (25)$$

с условиями

$$\begin{aligned}\lambda(0) &= -\Phi'_1 \gamma \\ \lambda(ij + 0) &= \lambda(ij - 0) - \Phi'_j \gamma \quad j = \overline{1, l-1}. \\ \lambda(p) &= \Phi'_l \gamma\end{aligned}$$

Далее, как в непрерывном случае для определения неизвестного вектора

$$z = \left[ \begin{array}{l} x(i_0), \lambda(i_0), x(i_1), \lambda(i_1 - 0), \lambda(i_1 + 0), x(i_2), \lambda(i_2 - 0), \lambda(i_2 + 0), \dots \\ \dots, x(i_k), \lambda(i_k - 0), \lambda(i_k + 0), \dots, x(i_{l-1}), \lambda(i_{l-1} - 0), \lambda(i_{l-1} + 0), x(i_l), \lambda(i_l) \end{array} \right]$$

получаем уравнение, аналогичное (21).

Отметим, что сравнения полученных результатов в непрерывном и дискретном случаях показали сходимость решения дискретной задачи к решению соответствующей непрерывной задачи.

Во втором параграфе второй главы описывается разработанный метод прогонки для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями, в непрерывном и в дискретном случаях.

Сначала рассматривается непрерывный случай, где с помощью метода прогонки многоточечная краевая задача сводится к задаче Коши, т.е. многоточечное краевое условие сводится к начальному условию. С этой целью множитель Лагранжа  $\lambda(t)$  представляется в виде

$$\lambda(t) = S(t)x(t) + N(t)\gamma + \omega(t), \quad t \in [0, t],$$

где  $S(t)$ ,  $N(t)$  и  $\omega(t)$  неизвестные функции. Для определения  $S(t)$ ,  $N(t)$  и  $\omega(t)$  используем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{S}(t) = -F'(t)S(t) - S(t)F(t) + S(t)M(t)S(t) - Q(t)$$

$$\dot{N}(t) = [S(t)M(t) - F'(t)]N(t)$$

$$\dot{\omega}(t) = [S(t)M(t) - F'(t)]\omega(t) - S(t)v(t).$$

Используя методику для определения начального значения  $x(t_0)$  и лагранжевого множителя  $\gamma$  получаем систему алгебраических уравнений

$$\begin{bmatrix} S(t_0) & N(t_0 + 0) + \Phi_0 \\ \Phi_0 + N'(t_0 + 0) & \sum_{i=1}^{p-1} n(t_i + 0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_0) \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega(t_0) \\ q - \sum_{i=0}^{p-1} W(t_i + 0) \end{bmatrix},$$

где  $n(t)$ ,  $W(t)$  являются решениями дифференциальных уравнений

$$\dot{n}(t) = N'(t)M(t)N(t)$$

$$\dot{W}(t) = N'(t)[M(t)\omega(t) - v(t)].$$

Далее, рассматривается дискретная задача оптимального управления с многоточечными краевыми условиями, для которой применяется метод прогонки. Как и в непрерывном случае, и здесь с помощью алгоритма прогонки краевые условия сводятся к начальному условию, после чего решение задачи находится рекуррентном способом. На самом деле, здесь множитель Лагранжа  $\lambda(i)$ , являющийся решением уравнения

$$x(i+1) = \psi(i)x(i) - M(i)\lambda(i+1), \quad i = \overline{0, p-1},$$

$$\lambda(i) = Q(i)x(i) + \psi'(i)\lambda(i+1),$$

$$\lambda(0) = -\Phi_1' \gamma,$$

$$\lambda(j+0) = \lambda(j-0) - \Phi_j' \gamma, \quad j = \overline{1, l-1},$$

$$\lambda(p) = \Phi'_l \gamma$$

ищется в виде

$$\lambda(i) = S(i)x(i) + N(i)\gamma + \omega(i), \quad i = \overline{0, p}.$$

Здесь  $S(i), N(i)$  и  $\omega(i)$  дискретные функции, которые являются решениями системы уравнений:

$$S(i) = \psi'(i)S(i+1)[E - M(i)S(i+1)]^{-1}\psi(i) + Q(i)$$

$$N(i) = \psi'(i)[E - M(i)S(i+1)]^{-1}N(i+1)$$

$$\omega(i) = \varphi'(i)[E - M(i)S(i+1)]^{-1}\omega(i+1).$$

Как и в непрерывном случае, для определения начального значения  $x(i_0)$  и лагранжевого множителя  $\gamma$  получим систему алгебраических уравнений, которую можно записать в следующей матричной форме

$$\begin{bmatrix} S(i_0) & N(i_0 + 0) + \Phi'_0 \\ N'(i_0) + \Phi_0 & \sum_{i=0}^{l-1} n(i_{l-k}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(i_0) \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega(i_0) \\ q - \sum_{i=0}^{l-1} W(i_{l-k}) \end{bmatrix}.$$

В третьем параграфе второй главы на основе математической модели, рассмотренной в пятом параграфе первой главы, ставится задача оптимального управления. С этой целью, система уравнений в частных производных

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{c^2}{\bar{F}} \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} = -\bar{F} \frac{\partial P}{\partial x} - 2aQ \end{cases} \quad (26)$$

методом прямых сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dP_k}{dt} = -\frac{c^2}{\bar{F} \cdot l_k} (Q_k - Q_{k-1}) \\ \frac{dQ_k}{dt} = -\frac{\bar{F}}{l_k} (P_k - P_{k-1}) - 2aQ_k \end{cases}, \quad (27)$$

для которой ставится задача построения оптимальных траекторий и управлений при добыче нефти. Принимая в качестве управления давление и объем закачиваемого газа, она методом прямых сводится к линейно-квадратичной задаче оптимального управления

$$\dot{x} = Fx + Gu + v \quad (28)$$

$$x(0) = q \quad (29)$$

$$J = \frac{1}{2} \alpha [Q_4(T) - \bar{Q}]^2 + \frac{1}{2} \int_0^T u' R u dt \rightarrow \min, \quad (30)$$

которая решается тем же методом, что и в первом параграфе второй главы. Решение задачи оптимального управления газлифтного процесса осуществлена как для непрерывного, так и дискретного случаев.

В четвертом параграфе второй главы разработан асимптотический метод решения задачи оптимального управления газлифтной эксплуатации. Следует отметить, что при большой длине глубины скважины для получения достаточной точности необходимо разделить эту длину на достаточно большое количество отрезков. Это в свою очередь приводит к увеличению размерности системы, следовательно к большим вычислениям, нежелательных для решения таких задач. Поэтому, целесообразно использовать другие, менее громоздкие в вычислительном аспекте методы. Одним из таких методов является асимптотический метод, который применяется в этих задачах, когда в качестве малого параметра используется величина, обратная глубине

скважины. Взяв  $\varepsilon = \frac{1}{2L}$  получим систему уравнений

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{c^2}{F} \frac{\partial Q}{\partial z} \varepsilon, \quad z \in (0,1),$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -F \frac{\partial P}{\partial z} \varepsilon - 2aQ,$$

к которой применяется асимптотический метод как для непрерывного, так и дискретного случаев. Применяя тот же метод прямых и взяв

$l = \frac{1}{N}$ , получим при  $N = 2$

$$P_1 = -\frac{c_1^2 \varepsilon}{F_1 l} Q_1 + \frac{c_1^2 \varepsilon}{F_1 l} Q_0,$$

$$Q_1 = -\frac{F_1 \varepsilon}{l} P_1 + \frac{F_1 \varepsilon}{l} P_0 - 2a_1,$$

$$P_2 = -\frac{c_2^2 \varepsilon}{F_2 l} Q_2 + \frac{c_2^2 \varepsilon}{F_2 l} Q_1 + \frac{c_2 \varepsilon}{F_2 l} Q_{pl},$$

$$Q_2 = -\frac{F_2 \varepsilon}{l} P_2 + \frac{F_2 \varepsilon}{l} P_1 - 2a_2 Q_2 + \frac{F_2 \varepsilon}{l} P_{pl}.$$

И для этой системы ставится линейно-квадратичная задача оптимального управления, т.е. требуется найти такие  $x, u$ , которые удовлетворяли бы уравнению

$$\dot{x} = (A_0 + A_1 \varepsilon)x + B \varepsilon u + C \varepsilon \quad (31)$$

и начальному условию

$$x(0) = x^0, \quad (32)$$

и при этом минимизируют функционал

$$J = \frac{1}{2}(x(T) - \bar{x})'N(x(T) - \bar{x}) + \frac{1}{2} \int_0^T u' \bar{R} u dt \quad (33)$$

Пятый параграф второй главы посвящен решению дискретной задачи оптимального управления с трехточечными краевыми условиями со сингулярной матрицей разомкнутой системы.

Третья глава диссертации посвящена разработке методов решения задачи оптимальной стабилизации программных траекторий и управления. Сначала в первом параграфе третьей главы рассматривается задача оптимальной стабилизации движения плунжера штанго-насосной установки, для которой решения получены как для непрерывного, так и дискретного случаев. Далее, решена задача оптимальной стабилизации газлифтной эксплуатации для непрерывного и дискретного случаев.

Чтобы поддерживать желаемый дебит в определенное время, целесообразно определить программные траектории и управления

$$x_{np}(t) = \begin{cases} x_{op}(t) & t < T \\ x_{op}(T) & t \geq T, \end{cases} \quad u_{np}(t) = \begin{cases} u_{op}(t) & t \leq T \\ u_{op}(T) & t > T \end{cases}, \quad (34)$$

которые будут использованы при построении соответствующих регуляторов. Здесь  $x_{op}(t)$  и  $u_{op}(t)$  решения задачи (28)-(30).

Обозначая  $\varepsilon(t) = x(t) - x_{pr}(t)$ ,  $v(t) = u(t) - u_{pr}(t)$  для стабилизируемого объекта имеем следующую систему уравнений

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + Gv, \quad (35)$$

где требуется определить такой закон регулирования

$$v = K\varepsilon, \quad (36)$$

который минимизировал бы квадратичный функционал



$$J = \frac{1}{2} \int_0^T (\varepsilon^T Q \varepsilon + v^T R v) dx, \quad (37)$$

Для определения  $K$  имеется следующая формула

$$K = -R^{-1} G^T S,$$

где  $S$  - является положительно-определенным решением следующего матричного алгебраического уравнения Риккати

$$-A^T S - SA + SGR^{-1}G^T S - Q = 0. \quad (38)$$

Данная задача стабилизации учитывает все координаты объекта, т.е. полную информацию. Однако нас интересует только дебит  $Q_2(T)$ , поэтому задачу стабилизации можно выполнить по дебиту, т.е. пусть наблюдается  $y = Cx$ , где  $C = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$  и требуется найти регулятор по выходу. И в этом случае решается задача стабилизации и находится соответствующий регулятор.

Эти задачи решены и в дискретной постановке.

Четвертая глава диссертации посвящена диагностике неисправностей штанго-насосной установки. В первом параграфе четвертой главы описываются математические основы неисправностей штанго-насосных установок. Здесь, используя математическую модель движения плунжера, построена динамограмма нормальной работы насоса.

Во втором параграфе четвертой главы описывается метод диагностики штанго-насосных установок в полуавтоматическом режиме. Суть данного метода заключается в том, что сначала формируется база данных динамограмм, которые соответствуют различным неисправностям, и далее, любая динамограмма, поступающей в компьютер, визуальнo сравнивается динамограммами из базы данных и принимается решение о виде неисправности штанго-насосной установки.

В третьем параграфе четвертой главы используются нейронные сети для диагностирования неисправностей штанго-насосных установок. Классифицировав динамограммы по неисправностям и

задавая эти динамограммы как входные параметры, строится нейронная сеть и затем обучается нейронная сеть, которая затем позволяет определять неисправность по конкретной динамограмме.

Пятая глава диссертации посвящена вычислительным алгоритмам построения программных траектории и управления для задачи оптимального управления с трёхточечными краевыми условиями, задачи оптимального управления газлифтного процесса, а также алгоритмам стабилизации около программных траектории.

В первом параграфе пятой главы дается описание алгоритма решения задачи оптимального управления с трёхточечными краевыми условиями с повышением размерности исходной задачи. Здесь же излагаются результаты численного эксперимента.

Во втором параграфе пятой главы описывается разработанный численный алгоритм метода прогонки для решения задачи оптимального управления с трёхточечными краевыми условиями. На основе проведенного численного эксперимента для модельной задачи проверяется совпадение полученных численных результатов с точными решениями рассматриваемой задачи.

В третьем параграфе пятой главы описывается алгоритм для решения задачи построения программных траекторий и управления газлифтной эксплуатации. Получены зависимости дебита нефти от количества подаваемого в скважину газа при различных  $T$ , а также зависимости избыточного давления над ее статическим значением  $P(t)$  и усредненной по поперечному сечению скорости движения смеси  $Q(t)$  от времени  $t$ .

В четвертом параграфе пятой главы описывается алгоритм для решения задачи оптимальной стабилизации газлифтной эксплуатации. Результаты численного анализа и построенные графики на основе этих результатов показывают осуществление стабилизации движения около программного.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке численно-аналитических методов и вычислительных алгоритмов решения задач оптимизации и диагностики для некоторых механических систем. В математической постановке задача состоит в приведении ряда практических задач к задачам оптимального управления и разработке численно-аналитических методов для решения этих задач. Эта задача интересна тем, решение многих практических проблем сводится к такой задаче. К этим проблемам относятся задача оптимальной эксплуатации нефтяных скважин штанго-насосными установками и газлифтным способом. Самостоятельный интерес представляют такие задачи оптимального управления, траектория которой удовлетворяет определенным условиям не только в одной точке, а в нескольких значениях временного интервала, которые в свою очередь могут быть разделенными и неразделенными условиями. Такие задачи оптимального управления встречаются в задачах управления космическими объектами, оптимизации производственных процессов, управления движением шагающего аппарата, управления штанго-насосных установок и т.д.

Не менее интересной является задача диагностики механических систем, имеющая различные применения в ряде практических задач.

Разработанные в диссертации численно-аналитические методы решения таких задач позволяют построить эффективные вычислительные алгоритмы для решения различных прикладных задач оптимизации.

В диссертации дан аппарат для диагностирования механических систем, в частности, для определения неисправностей штанго-насосных установок с использованием нейронных сетей.

Полученные в диссертации результаты могут непосредственно применены к решению широкого класса других прикладных задач, имеющие актуальное значение для ряда отраслей промышленности.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

- построена и обоснована математическая модель работы штанго-насосной установки, в которой периодическое движение плунжера ШСГНУ рассматривается в четырех фазах, где учитываются продольные колебания и деформации штанга. Такая модель позволяет впервые поставить различные задачи оптимального управления;

- разработаны новый численно-аналитический метод, повышающий размерность исходной задачи и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями;
- разработаны новый численно-аналитический метод прогонки и соответствующий вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями, возникающие, в частности, при управлении ШСГНУ;
- разработаны новый численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимального управления газлифтной эксплуатации нефтяных скважин;
- разработаны численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимальной стабилизации работы штанго-насосной установки около соответствующих программных траектории и управления;
- разработаны численно-аналитический метод и вычислительный алгоритм для решения задачи оптимальной стабилизации газлифтной эксплуатации около соответствующих программных траектории и управления;
- на основе математической модели, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных, получены аналитические формулы для построения теоретических динамограмм.
- создана база данных и разработан метод определения неисправностей штанго-насосных установок в полуавтоматическом режиме;
- на основе нейронных сетей WTA разработан новый метод диагностики для определения неисправностей штанго-насосных установок.

**Основные результаты диссертации опубликованы в  
следующих работах:**

1. Aliev F.A., Abbasov A.N., Gurbanov R.A., Nuriyev N.B., Guliyev F.A., Mutallimov M.M. Mathematical modelling for control problem and well subsurface pump units operation diagnostics in oil field. // Applied and Computational Mathematics an International Journal., v.1, №1, 2002, p.93-105. **Impact Factor ISI (2011)- 0.551**

2. Aliev F.A., Abbasov A.N., Муталлимов М.М. Numerical solution of control problem and well subsurface pump units operation diagnostics in oil field. / Third Joint Seminar On Applied Mathematics Baku State University and Zanjan University. Baku – Azerbaijan. 6-8 September 2002, p.19.

3. Aliev F.A., Abbasov A.N., Mutallimov M.M. Numerical solution of the problems of control and diagnostics subsurface pump units // Proceedings of IMM of NAS of Azerbaijan, 2002, v. 16 (24), p.180-185.

4. Аббасов А.Н., Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т. Ускоренное движение верхнего конца штанги без учета веса плунжера. / Материалы Международной Научной Конференции ”Современные Проблемы Математики, Механики и Информатики” посвященная 80-летию со дня рождения проф.Л.А.Толоконникова. Россия, Тула, 2003, с. 56-58.

5. Aliev F.A., Abbasov A.N., Mutallimov M.M. Algorithm for solution of the problem of optimization of the energy expenses at the exploization of chinks by subsurfase –pump installations // Applied and Computational Mathematics. An International Journal, 2004, v.3, №1, p. 2-9. **Impact Factor ISI (2011) - 0.551**

6. Алиев Ф.А., Аббасов А.Н., Велиева Н.И., Муталлимов М.М., Гулиев Ф.А., Мамедова Л.И. Разработка информационно-поисковой системы для контроля работы штанговых скважинных глубинно-насосных установок. / “Xəzərneftqazyataq-2004 Elmi-təcrübi konfransının məruzələri, Bakı-2004., s. 313-321.

7. Аббасов А.Н., Муталлимов М.М., Велиева Н.И., Нуриев Н.Б., Фатуллаев А.Б. Диагностирование работы штанговых скважинных глубинно-насосных установок. / “Xəzərneftqazyataq-2004 Elmi-təcrübi konfransının məruzələri, Bakı-2004., s.322.

8. Алиев Ф.А., Муталлимов М.М. Алгоритмы решения задачи оптимального управления с трехточечными неразделенными краевыми условиями. // Проблемы Управления и Информатики, 2005, № 4, с. 36-45.

Aliev F.A., Mutallimov M.M. Algorithms for Solving the Problem of Optimal Control with Three-point Unseparated Boundary Condition. / Journal of Automation and Information Sciences, 2005, v 37, i7, pp. 30-39.

**Impact Factor ISI (2011) - 0.02**

9. Ismailov Sh.Z., Ramazanov K.N., Safarova N.A., Hashimov A.M., Mutallimov M.M. Synthesis of the optimal stabilization system for the plunger in well deep pump units. / The 1-st International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications. May, 22-25, 2005. p. 57.

10. Ismailov Sh.Z., Nuriyev N.B., Babayev M.B., Abbasov A.N., Guliev F.A., Mutallimov M.M., Zulfugarova R.T. Qualitative investigations of gusher exploitation process. / The 1-st International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications. May, 22-25, 2005. p. 58.

11. Jamalov Y.T., Ismailov Sh.Z., Mutallimov M.M., Hashimov A.M., Ramazanov K.N., Aliev F.A. Optimization methods application of pump rods devices control with saving in energy consumption. / The 1-st International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications. May, 22-25, 2005. p. 59.

12. Аббасов А.Н., Муталлимов М.М. Моделирование вынужденных продольных колебаний плунжера в скважинных установках. // Доклады НАН Азербайджана. Том LXI, №1, 2005, с.28-34.

13. Аббасов А.Н., Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т. Об одном решении задачи оптимального управления с трехточечными краевыми условиями. Тезисы Международной конференции, посвященной 50-летию со дня рождения чл.корр. НАНА, профессора И.Т.Мамедова, Баку-2005, с. 7.

14. Муталлимов М.М., Аббасов А.Н., Агамалиева Л.Ф. Алгоритм решения дискретной задачи оптимального управления с трехточечными краевыми условиями. / Тезисы Международной конференции, посвященной 50-летию со дня рождения чл.корр. НАНА, профессора И.Т.Мамедова, Баку-2005, с. 147.

15. Муталлимов М.М. Алгоритм решения трехточечной краевой задачи дискретного оптимального управления со сингулярной матрицей разомкнутой системы. // Доклады НАН Азербайджана, 2006, т. LXII, № 1, с.20-25.

16.Аббасов А.Н., Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т. Об одном алгоритме решения трёхточечной краевой задачи дискретного оптимального управления с сингулярной матрицей разомкнутой системы. / Тезисы XII Межд. Конференции по Математике и Механике, посв. 70 летн. юбилею чл.корр. НАН Азербайджана, проф.Б.А.Искендерова, Баку, 2006, с.9.

17.Алиев Ф.А., Аббасов А.Н., Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т. Решение задачи оптимального управления с трёхточечными неразделенными краевыми условиями. / XIII International Conference On Automatic Control (Automatics-2006), Vinnytsia, 2006, с.36.

18.Муталлимов М.М.,Зульфугарова Р.Т. Алгоритм прогонки для решения задачи оптимального управления с трёхточечными краевыми условиями. / АМЕА-nın həqiqi üzvü, prof. M.L.Rəsulovun 90 illiyinə həsr olunmuş “Riyazi Fizikanın Üsulları” elmi konfransının materialları, Bakı, 2006, s.138-139.

19. Əliyev F.Ə., Mütəllimov M.M., Nuriyev N.B. Vəliyeva N.İ. və b. Birpilləli ştanqlı nasos qurğularının yarımavtomat rejimdə kompüter diaqnostikası üsulları. Bakı: Elm, 2007, 96 s.

20.Муталлимов М.М. Алгоритм “прогонки” для решения задачи оптимизации с неразделенными трехточечными краевыми условиями. // Докл. НАН Азербайджана, 2007, т. LXIII, № 2, с. 24-29.

21.Муталлимов М.М., Гулиев А.П., Зульфугарова Р.Т. Вычислительный алгоритм для решения задач оптимального управления с трехточечными краевыми условиями. // Известия НАН Азербайджана, 2007, т. XXVII, № 2-3, с.115-120.

22.Алиев Ф.А., Муталлимов М.М., Гулиев А.П., Зульфугарова Р.Т. Об одном алгоритме прогонки для решения дискретной задачи оптимального управления с трехточечными краевыми условиями. / “Riyaziyyatın tətbiqi məsələləri və yeni informasiya texnologiyaları” respublika elmi konfransının materialları, Sumqayıt, 2007, с. 129-130.

23.Алиев Ф.А., Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т. Метод прогонки для решения задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями. / Тезисы Научной Конференции, посвященной 90 летному юбилею чл. корр. НАН Азербайджана, профессора Г.Т.Ахмедова. Баку, 2007, с.53.

24.Mutallimov M.M., Zulfugarova R.T., Quliev A.P., Ismailov N.A. A sweep method for numerical solution of optimal control problem with three-point boundary conditions. / II Türk Dünyası Matematik Simpoziumu, 4-7 iyul 2007, Sakarya, s. 121.

25.Алиев Ф.А., Муталлимов М.М., Гулиев А.П., Зульфугарова Р.Т. Алгоритм прогонки для численного решения задачи оптимального управления с трехточечными краевыми условиями. // Материалы 15-й Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, 2007, Алушта, с.44-46.

26.Муталлимов М.М., Гулиев А.П., Зульфугарова Р.Т.. Применение метода Рунге-Кутты для решения задачи оптимального управления с трехточечными краевыми условиями. / Тезисы научной конференции, посвященной 85 летию Г.Алиева, Баку, 2008, с.87-88.

27.Алиев Ф.А., Зульфугарова Р.Т., Муталлимов М.М. Алгоритм прогонки для решения задач оптимального управления с трёхточечными краевыми условиями. // Проблемы Управления и Информатики, 2008, № 4, с. 48-57.

Aliev F.A., Zulfugarova R.T., Mutallimov M.M. Sweep Algorithm for Solving Discrete Optimal Control Problems with Three-point Boundary Conditions. Journal of Automation and Information, 2008, vol. 40, i7, p.48-58. **Impact Factor ISI (2011) - 0.02**

28.Mutallimov M.M., Zulfugarova R.T. Sweep algorithm for solving an optimal control discrete problem with three-point boundary conditions. / The 2-nd International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications. Baku, Azerbaijan, 2008, p.181.

29.Zulfugarova R.T., Mutallimov M.M. On one model of forced longitudinal vibrations of a plunger in pumping units. / The 2-nd International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications. Baku, Azerbaijan, 2008, p.137.

30.Алиев Ф.А., Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т. Метод прогонки для решения дискретной задачи оптимального управления с неразделенными трехточечными краевыми условиями. / Материалы докладов XV Международной Конференции по Автоматическому Управлению. Одесса, 2008. с.7-11.

31.Муталлимов М.М., Сафарова Н.А. Задача оптимального управления эксплуатации нефтяных скважин газлифтным способом. / Материалы 16-й Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Алушта, 2009, с.542-545.

32.Алиев Ф.А., Муталлимов М.М., Ильясов М.Х., Велиева Н.И., Джамалбеков М.А. Алгоритм стабилизации программных траектории и управления при добыче нефти газлифтным способом. // Труды



конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль Хорезми 2009», 2009, с.93-97

33. Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т., Гулиев А.П. Алгоритм прогонки для решения задач оптимального управления с неразделенными краевыми условиями. // Вестник БГУ, серия физико-математических наук, №2, 2009, Баку, с.39-46.

34. Зульфугарова Р.Т., Гулиев А.П., Исмаилов Н.А., Муталлимов М.М. Одновременный вычислительный алгоритм прогонки для решения задачи оптимального управления с двухточечными неразделенными краевыми условиями. // Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук, том XXIX, №3, 2009, Баку, стр.65-69.

35. Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т. Метод прогонки для решения дискретной задачи оптимального управления с многоточечными краевыми условиями // Доклады НАН Азербайджана, том LXV №4, 2009, с.71-77.

36. Mutallimov M.M., Aliev F.A., Jamalbayov M.A., Zulfugarova R.T., Namazov M.A. On a problem of optimal control of oil well operation by the gas-lift method. / Abstracts of the third congress of the world mathematical society of Turkic countries. Almaty, 2009, p.92.

37. Zulfugarova R.T., Mutallimov M.M. On a solution method of an optimal control problem with multipoint boundary conditions. / Abstracts of the third congress of the world mathematical society of Turkic countries. Almaty, 2009, p.102.

38. Муталлимов М.М., Зульфугарова Р.Т., Гулиев А.П. Алгоритм прогонки для решения задач оптимального управления с неразделенными краевыми условиями. // Вестник БГУ, серия физико-математических наук, №2, 2009, Баку, с.153-160.

39. Алиев Ф.А., Муталлимов М.М. Алгоритм для решения задачи построения программных траектории и управления при добыче нефти газлифтным способом. // Доклады НАН Азербайджана, том LXV, №5, 2009, с.9-18.

40. Алиев Ф.А., Муталлимов М.М., Аскеров И.М. Асимптотический метод решения задачи построения оптимальных режимов газлифтного процесса. Доклады НАН Азербайджана, том LXVI, № 1, 2010, с. 26-33.

41. Aliev F.A., Mutallimov M.M., Askerov I.M., Raguimov I.S. Asymptotic Method of Solution for a Problem of Construction of Optimal Gas-lift Process Modes. // Mathematical Problems in Engineering, vol.

2010, Article ID 191053, 10 pages, 2010. (E-version - <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2010/191053.html>) **Impact Factor ISI (2011) - 0.777**

42. Mutallimov M.M., Askerov I.M., Ismailov N.A., Rajabov M.F. An asymptotical method to construction a digital optimal regime for the gaslift process. // *Applied and Computational Mathematics. An International Journal*. Volume 9, № 1, 2010, pp.77-84. **Impact Factor ISI (2011) - 0.551**

43. Алиев Ф.А., Муталлимов М.М., Гасымов Ю.С. Алгоритмы решения пространственной задачи построения программных траектории и управления газлифтного процесса. / Международная конференция, посвященная 80-летнему юбилею академика Ф.М.Максудова, Баку-2010, с.56-58.

44. Ghasemi Habashi Y.A., Mutallimov M.M. Diagnosting the occurring derangements in exploitation the oil wells bar pump by using the neuron network // *Journal of Qafqaz University*, Volume 1, № 29, 2010, с.118-122.

45. Алиев Ф.А., Исмаилов Н.А., Велиева Н.И., Муталлимов М.М. Алгоритм построения оптимальных цифровых регуляторов при добыче нефти газлифтным способом // Доклады НАН Азербайджана, том LXVI, № 4, 2010, с. 39-45.

46. Исмаилов Н.А., Гулиев А.П., Муталлимов М.М., Бабаев А.А. Алгоритм построения оптимального дискретного режима скважины, эксплуатируемой газлифтным способом // Вестник Бакинского Университета, серия физико-математических наук, №4, 2010, с.66-73.

47. Муталлимов М.М., Исмаилов Н.А., Аскеров И.М., Ибрагимов Х.М., Раджабов М.Ф. Исследование асимптотического метода для создания оптимального регулятора в газлифтных скважинах // Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук, том XXXI, № 6, 2011, с.14-19.

48. Aliev F.A., Niftiev A.A., Mutallimov M.M., Guliev A.P. Optimal control problem involving hyperbolic type partial differential equation with impulse influence. / 3rd International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2011), Bilkent University, Ankara, Turkey, p.150-151.

49. Алиев Ф. А. , Муталлимов М. М. , Исмаилов Н. А. , Раджабов М. Ф. Алгоритмы построения оптимальных регуляторов при газлифтной эксплуатации // *Автоматика и телемеханика*, 2012, № 8, с.3–15.

Aliev F.A., Mutallimov M.M., Ismailov N.A., Radzhabov M.F. Algorithms for constructing optimal controllers for gaslift operation // Automation and Remote Control, 2012, Volume 73, Issue 8, pp 1279-1289.

**Impact Factor ISI (2011) - 0.246**

50. Маджид-заде К., Муталлимов М.М., Нифтиев А.А. Задача оптимизации крутильной жесткости призматического тела относительно поперечного сечения // Прикладная математика и механика, 2012. Т. 76. Вып. 4, с. 667-671.

Majidzadeh K., Mutallimov M.M., Niftiyev A.A. The problem of optimizing the torsional rigidity of a prismatic body about a cross section // Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2012, Volume 76, Issue 4, p. 482-485. **Impact Factor ISI (2011) - 0.323**

51. Муталлимов М.М., Алиев Ф.А. Методы решения задач оптимизации при эксплуатации нефтяных скважин. Saarbrücken (Deutschland): LAP LAMBERT, 2012, 164 с.

52. Намазов М.А., Муталлимов М.М. Алгоритм решения двумерной задачи построения программных траектории и управления газлифтного процесса // Теоретическая и прикладная механика, 2012, № 1 (25), с.121-126.

#### **Личный вклад соискателя в совместно опубликованных научных работах:**

[1], [3], [5], [7], [8], [11], [12], [17], [22], [24], [27], [30], [31], [32], [38] – Обсуждены необходимые теоретические исследования, разработан алгоритм и создано программное обеспечение.

[2], [4], [5], [9], [10], [23], [36], [39], [43] – Разработаны численные алгоритмы.

[6], [13], [14], [16], [18], [21], [25], [26], [28], [29], [31], [33], [34], [37], [39], [36], [52] – Предложены теоретические основания для разработки алгоритма.

[19] – Написаны введение и теоретическая часть первой главы монографии, обсуждены другие части и программное обеспечение.

[35], [40], [41], [42], [44], [45], [46], [47], [48], [49], – Проведены необходимые теоретические исследования.

[50] – Обсуждены необходимые теоретические исследования.

[51] – Написаны основные главы монографии, обсуждены другие части.

## **Mütəllim Mirzəhəməd oğlu Mütəllimov**

Mexaniki sistemlər üçün optimallaşdırma və diaqnostika məsələlərinin həllinin ədədi-analitik üsulları və hesablama alqoritmləri

### **XÜLASƏ**

Dissertasiya işi bəzi mexaniki sistemlər üçün qoyulmuş optimallaşdırma və diaqnostika məsələlərinin ədədi-analitik həll üsullarının və hesablama alqoritmlərinin işlənməsinə həsr olunmuşdur. Riyazi qoyuluşda məsələ bir sıra praktiki məsələlərin optimal idarəetmə məsələsinə gətirilməsindən və onlar üçün ədədi-analitik həll üsullarının hazırlanmasından ibarətdir. Bu məsələ həm də onunla maraqlıdır ki, bir çox praktiki problemlərin həlli belə məsələyə gətirilir. Bu problemlərə neft quyularının ştanqlı nasos qurğuları və qazlift üsulu ilə optimal istismarı məsələsini gətirmək olar. Optimal trayektoriyanın zaman intervalının yalnız bir nöqtəsində deyil, bir neçə nöqtəsində müəyyən, özü də həm həm ayrılan, həm də ayrılmaz şərtləri ödədiyi optimal idarəetmə məsələləri xüsusi maraq doğurur. Belə optimal idarəetmə məsələləri kosmik obyektlərin idarə olunmasında, istehsal proseslərinin optimallaşdırılmasında, addımlayan aparatın, ştanqlı nasos qurğularının idarə olunmasında və s. rast gəlinir.

Bir sıra praktiki məsələlərə tətbiq edilən mexaniki sistemlərin diaqnostikası məsələsi də ayrıca maraq doğurur.

Dissertasiyada bu cür məsələlərin həlli üçün hazırlanan ədədi-analitik üsullar optimallaşdırmanın müxtəlif tətbiqi məsələlərinin həlli üçün effektiv hesablama alqoritmləri qurmağa imkan verir.

Dissertasiyada mexaniki sistemlərin, xüsusi halda ştanqlı nasos qurğularının nasazlıqlarının müəyyən edilməsi üçün neyron şəbəkələrindən də istifadə edilməklə diaqnostikası üçün aparat verilmişdir.

Dissertasiyada alınan nəticələr sənayenin bir sıra sahələri üçün aktual əhəmiyyəti olan digər praktiki məsələlərin geniş sinfinin həllinə bilavasitə tətbiq oluna bilər.

## **Mutallim Mirzaahmed Mutallimov**

Numerical-analytical methods and computing algorithms to the solution of the optimization problems and diagnostics of the mechanical systems

### **SUMMARY**

The thesis is devoted to the development of the numerical-analytical methods and computing algorithms to the solution of the optimization problems and diagnostics of some mechanical systems. In mathematical formulation the problem consists of reducing the practical problems to the optimal control problems and development of the numerical-analytical methods to the solution of these problems. The considered problems are interesting, because the solution of many practical problems may be reduced to such ones. The problems of the optimal control of the oil wells exploiting by deep-well pump installations and gaslift method may be also reduced to this formulation. Independent interest represents optimal control problems, where the optimal trajectory satisfies to the certain conditions not only in one point, and in several time moments both separated and unseparated cases. Such optimal control problems are met in the problems of control of the space objects, optimization of the production units, control of movement of the biped apparatus and oil deep-well pump installations and etc. The problem of diagnostics of the mechanical systems, having various applications in practical problems are also present, both theoretical and practical interest.

Developed in the thesis numerical-analytical methods to the solution of such problems allow one to construct effective computing algorithms for the solution of various applied optimization problems.

In the thesis a mathematical apparatus is offered for the diagnosing of mechanical systems, in particular for definition of malfunctions of oil deep-well pump installations using neural networks.

The results obtained in the thesis can be directly applied to the solution of wide class of problems, having serious applications in the different fields of industry.

**AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI**  
**Akademik Ə.İ.HÜSEYNOV adına KİBERNETİKA İNSTİTUTU**

*Əlyazması hüququnda*

**MÜTƏLLİM MİRZƏƏHMƏD OĞLU MÜTƏLLİMOV**

**MEXANİKİ SİSTEMLƏR ÜÇÜN OPTİMALLAŞDIRMA VƏ  
DİAQNOSTİKA MƏSƏLƏLƏRİNİN HƏLLİNİN ƏDƏDİ-  
ANALİTİK ÜSULLARI VƏ HESABLAMA ALQORİTMLƏRİ**

1203.01 – Kompüter elmləri

Texnika elmləri üzrə elmlər doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilən dissertasiyanın

**AVTOREFERATI**

**BAKI - 2013**