

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Агафонов Евгений Дмитриевич

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ДИНАМИЧЕСКИХ
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ НЕФТЕПРОВОДЕ

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант – Медведев Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор

Красноярск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ В ТРУБОПРОВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ.....	20
1.1 Основные принципы построения систем мониторинга в магистральном трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов.....	20
1.2 Анализ проблем существующей системы мониторинга и контроля перекачки нефти в магистральном трубопроводном транспорте в Российской Федерации.....	32
1.3 Технические и программно-алгоритмические средства планирования технологических режимов в трубопроводном транспорте нефти.....	40
1.4 Возможности модернизации средств контроля и диагностики с целью энергоэффективной и безаварийной эксплуатации магистральных трубопроводов.....	44
Выводы по главе 1.....	48
2 АДАПТИВНЫЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ.....	50
2.1 Адаптивный подход к задаче идентификации дискретно- непрерывных объектов.....	50
2.2 Непараметрические методы идентификации статических объектов. Н-аппроксимация.....	56
2.3 Методы и алгоритмы идентификации линейных динамических объектов.....	68
2.4 Сходимость непараметрических моделей.....	86
2.5 Прогноз выбега насосных агрегатов.....	92
Выводы по главе 2.....	94
3 ЛИНЕЙНОСТЬ И ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ	

ОБЪЕКТОВ.....	96
3.1 Относительная мера нелинейности динамических объектов.....	96
3.2 Сходимость критерия относительной меры нелинейности для динамических объектов.....	112
3.3 Синтез адаптивного алгоритма управления линейными динамическими системами.....	115
3.4 Алгоритм линеаризации моделей динамических систем с использованием непараметрического регулятора. Реализация алгоритма для прогноза температуры нагревательных систем.....	140
Выводы по главе 3.....	153
4 АДАПТИВНЫЕ МОДЕЛИ МНОГОСВЯЗНЫХ СТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ.....	155
4.1 Идентификация комбинированных многосвязных систем.....	155
4.2 Модель гидравлической сети и особенности её синтеза.....	159
4.3 Адаптивная комбинированная модель гидравлической сети при установившихся режимах её работы.....	167
4.4 Численный анализ алгоритма синтеза и оптимизации комбинированной модели гидравлической сети.....	176
Выводы по главе 4.....	182
5 ПРОГНОЗ И КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА.....	184
5.1 Гибридные модели.....	184
5.2 Постановка задачи коррекции погрешностей показаний датчиков давления.....	188
5.3 Алгоритм коррекции показаний датчиков на основе адаптивных гибридных моделей.....	193
5.4 Результаты исследования алгоритмов коррекции и их анализ.....	196
Выводы по главе 5.....	201
6 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В	

МАГИСТРАЛЬНОМ НЕФТЕПРОВОДЕ.....	203
6.1 Обоснование использования имитационного подхода в задаче моделирования процессов в магистральном нефтепроводе	203
6.2 Уравнения гидродинамики для описания неустановившихся процессов в нефтепроводе.....	206
6.3 Способы решения уравнений гидродинамики. Метод характеристик..	210
6.4 Метод расчета параметров участка нефтепровода с использованием метода характеристик и его алгоритмическая реализация.....	215
6.5 Эвристическая модель неустановившихся процессов в нефтепроводе.....	221
Выводы по главе 6.....	227
7 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА MATLAB/SIMHYDRAULICS ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ НЕФТЕПРОВОДЕ.....	228
7.1 Характеристики программных продуктов, применяемых в процессе построения гидродинамических моделей магистрального нефтепровода.....	228
7.2 Использование Matlab/SimHydraulics для построения модели установившихся режимов работы магистрального нефтепровода.....	239
7.3 Анализ возможностей Matlab/SimHydraulics при моделировании неустановившихся процессов в трубопроводе.....	244
7.4 Учет теплообменных процессов в моделях магистральных нефтепроводов в пакете Matlab/SimHydraulics.....	253
7.5 Модели насосных агрегатов и нефтеперекачивающих станций в Matlab/SimHydraulics.....	256
7.6 О настройке модели с использованием измерений переменных технологического процесса.....	264
7.7 Модель технологического участка магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск».....	266

7.8 Прогноз энергозатрат при переходных режимах.....	271
Выводы по главе 7.....	274
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	276
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	279
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	281
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	313
Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационной работы...	314
Приложение Б. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.....	319

ВВЕДЕНИЕ

В диссертации представлено обобщение выполненных автором в 1995-2019 годах исследований в области синтеза и исследования адаптивных и обучающихся алгоритмов построения прогнозных моделей статических и динамических систем. Совместная работа с компаниями–эксплуатантами магистральных трубопроводов нефти и нефтепродуктов выявила возможность и целесообразность применения разработанных методов и алгоритмов в процессе мониторинга и анализа данных, получаемых с датчиков контроля технологических параметров оборудования нефтепровода. В результате удалось повысить эффективность решения задач прогнозирования параметров процесса перекачки нефти посредством включения предложенного алгоритмического и программно-технического обеспечения в модернизированную автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУТП). Основой модернизации является интеграция подсистем сбора и обработки информации, входящих в состав современных нефтепроводов, и применения в процессе управления адаптивных и обучающихся алгоритмов при построении прогнозных моделей. Таким образом, в процессе работы стало возможным получение новых научных результатов и достижения существенного эффекта от их использования при решении проблем автоматизированного управления магистральными нефтепроводами и совершенствования процессов расчета технологических режимов на объектах трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

Актуальность темы исследования. Эксплуатация сложных технических объектов, таких как магистральный нефтепровод, тесно связана с необходимостью решения проблем мониторинга и прогноза технологических параметров с целью последующего управления, оптимизации режимов работы, обеспечения безаварийной, экологически безопасной работы и экономии затрачиваемых ресурсов. Решение этих задач требует модернизации системы контроля технологических параметров, обеспечение их достоверности с

использованием усовершенствованных методов и средств сбора, обработки и анализа полученной информации.

Особенности магистрального нефтепровода как объекта мониторинга, а именно, его сложность, распределенный характер, потенциальная опасность, значимость в структуре нефтегазовой отрасли и народного хозяйства в целом, определяют актуальность исследований в рамках настоящей диссертационной работы. Существенную важность с точки зрения развития теории и практического применения представляет расчет и планирование технологических режимов, а также мониторинг протекающих процессов в нефтепроводе для повышения эффективности диспетчерского контроля и управления.

Принятие решений при эксплуатации магистрального нефтепровода основано на сопоставлении информации, содержащей плановые (прогнозные) и фактические (измеренные) значения таких технологических параметров, как давление, температура, показатели вибрации и так далее. Для прогноза значений технологических параметров в системах диспетчерского контроля и управления активно разрабатываются модели технологических процессов.

Известные на сегодняшний день и применяемые на практике методы и соответствующие им процедуры построения моделей технологических процессов в магистральном нефтепроводе не используют в полной мере доступную информацию об объекте, а также не рассматривают её изменчивость в зависимости от неизвестных, либо неучтенных факторов. Это негативно отражается на точности прогноза протекания технологических процессов, следовательно, и на адекватности решений, принимаемых в эксплуатации оборудования нефтепровода.

Особую значимость для решения практических задач мониторинга технологических параметров представляет алгоритмическое и программно-техническое обеспечение, позволяющее в режиме реального времени прогнозировать переходные (неустановившиеся) режимы работы в нефтепроводе. В существующих на сегодняшний день процедурах построения

моделей и созданном на их основе специализированном программном обеспечении зачастую отсутствует компромисс между стоимостью, точностью и быстродействием, поэтому такое алгоритмическое и программное обеспечение не востребовано, или имеет во многом ограниченную применимость на предприятиях трубопроводного транспорта нефти.

Следовательно, актуальной является разработка новых методов и реализующих их алгоритмов, позволяющих использовать преимущества, в частности, адаптивного и имитационного подходов к процессу обработки сигналов в средствах контроля нефтепровода в условиях неопределенности, а также построению моделей неустановившихся процессов, протекающих в магистральном нефтепроводе. Важным преимуществом разрабатываемых методов и алгоритмов становится более полный учет доступной информации об объекте, принятие во внимание стохастического, а также многосвязного характера объекта исследования.

Степень разработанности темы исследования. Решению задач автоматизации управления технологическими процессами, протекающими в нефтепроводе, были посвящены труды В.П. Тарасенко [197], С.В. Чирикова, Б.И. Мисевичуса, В.А. Саенко [215], О.Н. Рыжевского [179], [180], Л.А. Зайцева и Г.С. Ясинского [78], Р.М. Ахметова, Ю.В. Ливанова, А.В. Матвиенко [44], Я.Б. Кадымова [88], Р.А. Караева, А.А. Левина [89] и других исследователей. В большинстве работ были описаны как структура и состав средств и методов контроля, проблемы диспетчеризации и учета нефти, так и особенности модельного описания процессов, протекающих в нефтепроводе. В частности, имитационный подход к построению моделей распределенных систем, в том числе объектов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, рассматривался в работах В.В. Трофимова, В.П. Тарасенко, В.И. Мащенко [197]. Модели течения жидкости с учетом специфики трубопроводного транспорта нефти разрабатывались и совершенствовались научными школами Л.С. Лейбензона [116], И.А. Чарного [214], М.В. Лурье [119]. Теоретические основы построения систем управления с распределенными параметрами

занимались такие исследователи, как М.В. Мееров, Б.Л. Литвак [136], А.В. Ахметзянов, В.Н. Кулибанов [137], А.Г. Бутковский [52], Е.В. Вязунов [56], [57], [58] и другие.

Необходимость создания принципов и систем автоматизированного управления и принятия управленческих решений в условиях неопределенности привела к появлению во второй половине XX века *теории адаптивных систем*. Её становление связано с работами А.А. Фельдбаума [205], [206], [207], Я.З. Цыпкина [210], [211], [212], Л.А. Растиригина [167], [168], [169]. Одним из перспективных направлений в теории адаптивных систем стала теория непараметрического оценивания. Основой теории послужили работы М. Rosenblatt [267] и Е. Parzen [263]. В развитии теории в нашей стране внесли вклад Ф.П. Тарасенко [190], А.В. Медведев [110], [124]-[129], В.П. Живогляднов [76], Э.А. Надарая [147]-[150], А.И. Рубан [175], [176], Ю.Г. Дмитриев [72], Г.М. Кошкин [99]-[102], А.В. Добровидов [73].

Впоследствии принципы адаптации активно развивались в рамках теории машинного обучения и интеллектуального анализа данных. Важными явились приложения указанных теорий к исследованию коллективов (ансамблей) моделей (L. Breiman [234]-[236], M. Kearns [253], L. Valiant [279], А.В. Лапко [111]-[115]), искусственных нейронных сетей [241], генетических алгоритмов [256], а также комбинированных адаптивных моделей, в том числе для многосвязных систем (А.В. Медведев [128], [129], А.П. Красноштанов [103], [104]).

В частности, в работах А.В. Медведева и А.П. Красноштанова предложены основные принципы построения статических (безынерционных) комбинированных моделей технологических процессов. Рассматривается случай, когда процессы относятся к классу многосвязных дискретно-непрерывных с запаздыванием. С точки зрения практики такие модели позволяют работать в условиях недостатка априорной информации, наиболее полно использовать имеющуюся информацию и восполнять её, используя адаптивный подход.

Задачи синтеза и исследования непараметрических моделей для линейных динамических систем, а также построенных на их основе регуляторов, рассмотрены в работах А.В. Медведева [125], [259], А.А. Иванилова [80]-[83], С.Н. Чайки [82], Н.А. Медведевой [133], [185], [260], [261], О.В. Кузнецовой [107], А.Н. Пупкова [163], О.А. Иконникова [84], А.П. Руднева [177]. Такие модели зарекомендовали себя в решении задач идентификации динамических (инерционных) технологических процессов и создания управляющих систем в теплоэнергетике, стройиндустрии и на предприятиях цветной металлургии.

На практике в качестве основного подхода к построению моделей технологических режимов перекачки нефти в компании АО «Транснефть – Западная Сибирь» в настоящее время принимается процедура создания моделей стационарного течения нефти. Модель представляет собой большую систему нелинейных алгебраических уравнений, сформированную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети. Уравнения описывают установившиеся процессы, происходящие в узлах и независимых контурах сети. Параметры уравнений – коэффициенты гидравлического сопротивления, показатели характера течения жидкости и действующие напоры, переменные – объемные расходы по соответствующим участкам сети. Для численного решения системы уравнений применяется *модифицированный метод последовательных приближений*, идея которого была предложена Р.Т. Файзуллиним [203] и развита в работах К.В. Логинова и А.М. Мызникова [118], [143]-[145].

Практика эксплуатации магистрального нефтепровода показывает необходимость в построении нестационарных (динамических) моделей для описания переходных процессов в магистральном трубопроводе с учетом доступной априорной информации и преимуществ адаптивного подхода.

Диссертационная работа предусматривает дальнейшее развитие методологии, алгоритмического и программно-технического обеспечения в составе автоматизированных систем управления технологическими

процессами, реализующего адаптивный и имитационный подходы к построению моделей технологических процессов в нефтепроводе. Исследования направлены на создание эффективных расчетных процедур прогноза технологических режимов в неустановившихся режимах работы нефтепровода с привлечением новых методов моделирования. Это позволит в значительной степени ускорить процесс построения моделей и уточнить прогноз ключевых технологических параметров, включая электропотребление насосных агрегатов.

Цель и задачи. *Цель* диссертационной работы заключается в совершенствовании средств мониторинга и прогноза технологических параметров систем магистрального нефтепровода с привлечением комплекса алгоритмических и программно-технических средств построения адаптивных и имитационных моделей, позволяющего повысить безопасность и расширить уровень автоматизации при эксплуатации нефтепровода.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие *задачи*:

1. Проанализировать особенности магистрального нефтепровода как объекта мониторинга и управления, осуществить анализ подходов и методов построения моделей технологических процессов перекачки нефти в магистральном нефтепроводе;

2. Разработать и исследовать адаптивные непараметрические методы и алгоритмы прогнозирования состояния статических и динамических систем с применением модельного описания процессов в магистральном нефтепроводе;

3. Предложить метод исследования линейности динамических процессов с введением адаптивного критерия линейности, а также непараметрического алгоритма линеаризации моделей для использования при решении задачи построения модели работы электрических нагревательных элементов в нефтепроводе в условиях недостатка априорных сведений о характеристиках процесса нагрева;

4. Синтезировать метод и реализующее его алгоритмическое обеспечение идентификации многосвязных статических систем на основе оценки решения

систем нелинейных уравнений, предложить способ их применения для модельного описания нефтепроводной сети с целью повышения эффективности расчета расходов для ее участков в условиях недостатка априорных сведений;

5. Разработать алгоритм диагностирования состояния и коррекции погрешностей измерения давления на линейной части магистрального нефтепровода для использования в системах диспетчерского управления нефтепроводом;

6. Построить прогнозную имитационную модель магистрального нефтепровода и осуществить с ее помощью процедуру численного моделирования технологического участка нефтепровода;

7. Разработать практические рекомендации по использованию и адаптации пакета MATLAB/SimHydraulics при создании прогнозной модели процессов в магистральном нефтепроводе, включая настройку модели по данным измерений технологических параметров. Внедрить полученную модель в состав алгоритмических и программно-технических средств экспресс-прогноза протекания неустановившихся процессов технологического участка магистрального нефтепровода.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработан новый метод прогноза выбега магистральных насосных агрегатов на базе адаптивных непараметрических моделей динамических систем, отличающийся возможностью применения в условиях априорной неопределенности и наличия погрешностей в данных измерений давления и расхода, позволяющий расширить инструментарий средств контроля в нефтепроводе при отключении насосных агрегатов.

2. Впервые предложен метод синтеза математического обеспечения для построения динамической модели электрического нагревательного элемента, входящего в состав системы путевого электроподогрева нефти магистрального нефтепровода, отличающийся от существующих использованием линеаризованной модели динамических процессов в классе обобщенных

операторов, позволяющий прогнозировать температуру нагревателя в условиях недостатка априорных сведений.

3. Предложен новый метод прогнозирования технологических параметров трубопроводной сети на основе непараметрических моделей многосвязных систем, отличающийся от аналогичных использованием оценивания решения системы уравнений, составленной в соответствии с законами Кирхгофа, позволяющий повысить эффективность и скорость расчета технологических параметров.

4. Разработан новый интеллектуальный алгоритм диагностирования состояния датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода, отличающийся использованием в нем гибридной модели распределения давления вдоль участка нефтепровода с возможностью учета как априорных сведений о характере распределения давления, так и вновь поступающих измерений, позволяющий осуществлять контроль, диагностику неисправностей и коррекцию погрешностей датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода.

5. Предложен новый метод синтеза алгоритмического и программно-технического обеспечения для ускоренного прогнозирования распределенных технологических параметров (давление, расход, энергопотребление) в режиме реального времени при неустановившихся режимах работы магистрального нефтепровода, отличающийся составом и структурой применяемых алгоритмических и программных средств имитационного дискретного моделирования, и позволяющий усовершенствовать процесс планирования технологических режимов магистрального нефтепровода, а также обеспечить поддержку принятия решений в составе комплекса систем диспетчерского контроля и управления.

Результаты диссертационной работы получены как самостоятельно (пп. 1-3), так и в соавторстве, в частности, с Антроповым Н.Р. (п. 4) и Мироновым А.Г. (п. 5).

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертационной работе отражено развитие теории идентификации и теории адаптивных систем применительно к построению комбинированных адаптивных моделей многосвязных процессов. Особое внимание при этом уделялось приложению теории для синтеза моделей технологических процессов, имеющих дискретно-непрерывный характер.

Существенным теоретическим результатом можно считать разработанные методы и алгоритмы, позволяющие исследовать линейность процессов, протекающих в технологическом оборудовании. Предложен непараметрический критерий линейности и способ линеаризации моделей в терминах обобщенных моделей объектов в условиях недостатка априорной информации.

Работа содержит исследования применимости гибридных моделей при создании методов и алгоритмов выявления и компенсации погрешностей в текущей информации, поступающей с объекта.

Новые теоретические результаты получены при анализе и синтезе имитационных моделей распределенных процессов. В частности, решена задача сокращения времени вычисления с использованием средств дискретного моделирования и численной реализации расчетов моделей с распределенными параметрами.

Предложенные методы позволяют усовершенствовать процесс мониторинга технологических параметров в системах автоматизированного управления, сопряженный с расчетом технологических режимов функционирования технологического оборудования магистрального нефтепровода. Построенные модели, а также реализующее их алгоритмическое и программно-техническое обеспечение, позволяют учитывать нестационарный характер процесса, могут быть использованы для экономии электроэнергии при сохранении производительности, безопасности и экологичности функционирования магистрального нефтепровода.

Частично результаты диссертации получены в ходе выполнения НИОКР «Исследование адаптивных моделей и алгоритмов управления многомерными стохастическими системами с запаздыванием» (номер гос. регистрации в ЦИТиС 01201154216) в 2011-2013 г. в Сибирском государственном аэрокосмическом университете им. акад. М.Ф. Решетнёва [85]. По результатам работы получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ: «Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 1.0» (№2016660260 от 09.09.2016) [139], «Программный модуль последовательного обучения коллектива непараметрических оценок регрессии» (№2017611325 от 01.02.2017) [33], «Программный модуль адаптивного прогноза показаний датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода» (№2017611650 от 07.02.2017) [34], «Программный модуль вероятностного прогнозирования на основе параметрических, непараметрических и гибридных алгоритмов» (№2017619632 от 30.08.2017) [35], «Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 2.0» (№2018610986 от 19.01.2018) [140].

Разработанные в рамках диссертационного исследования алгоритмические и программно-технические средства пригодны для использования в составе комплекса средств автоматизированного контроля и управления при решении задач прогноза и анализа протекания технологических процессов как в магистральных, так и в технологических трубопроводах на предприятиях нефтегазовой отрасли России. Практическая значимость результатов работы в частности подтверждена актами о внедрении на предприятиях АО «Транснефть – Западная Сибирь» в отделе главного технолога, в ОАО «Красноярскнефтепродукт» в филиале «Центральный» для расчета технологических параметров в неустановившихся режимах и в АО «Таймырская топливная компания» на нефтебазе «Песчанка». Также, разработанное алгоритмическое и программно-техническое обеспечение мониторинга и прогноза процессов в магистральном нефтепроводе внедрено в учебный процесс кафедры «Проектирование и эксплуатация

газонефтепроводов» Института нефти и газа ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Копии актов о внедрении приведены в Приложении А.

Методология и методы исследования. При решении поставленных в работе задач применялись методы теории вероятностей и математической статистики, метрологии, теории графов, теории статистического и имитационного моделирования, теории непараметрического оценивания, интеллектуального анализа данных, теории идентификации, теории адаптивных систем, системного анализа, информатики и информационных технологий, гидравлики, гидродинамики, механики сплошных сред, проектирования автоматизированных систем. Для создания программно-технического обеспечения использовались программные среды и пакеты: Microsoft Visual Studio, Matlab совместно с инструментами Simulink, Simscape и SimHydraulics.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод прогнозного моделирования выбега магистральных насосных агрегатов на базе адаптивных непараметрических моделей динамических систем.

2. Метод синтеза математического обеспечения для построения динамической модели электрического нагревательного элемента в составе системы путевого электроподогрева нефти магистрального нефтепровода с использованием линеаризованной модели динамических процессов в классе обобщенных операторов.

3. Метод прогноза распределения потоков в разветвленной трубопроводной сети на основе непараметрических моделей многосвязных систем.

4. Алгоритм диагностирования состояния датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода, основанный на использовании гибридной модели распределения давления вдоль участка нефтепровода с возможностью учета как априорных сведений о характере распределения давления, так и вновь поступающих измерений.

5. Метод синтеза программного обеспечения для ускоренного прогнозирования распределенных технологических параметров (давление, расход, энергопотребление) в режиме реального времени при неустановившихся режимах работы магистрального нефтепровода, реализованный с применением алгоритмических и программных средств имитационного дискретного моделирования.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе обеспечивается применением формальных математических методов, численными экспериментами с элементами созданного алгоритмического обеспечения, достижения близости результатов моделирования к экспериментальным измеренным данным с использованием достоверных критериев. Результаты измерений технологических параметров подтверждены соответствующими актами, выполнены на сертифицированном и поверенном измерительном оборудовании согласно требованиям технических регламентов и внутренней документации компании - эксплуатанта оборудования.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах:

- IV Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», Москва, 2000;
- IASTED International Symposium «Applied Informatics 2001», Innsbruck, 2001;
- V Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2002;
- III Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'04, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, 2004;
- V Межвузовская конференция по научному программному обеспечению, Санкт-Петербург, 2007;

- XII Международный симпозиум по непараметрическим методам в кибернетике и системному анализу, Красноярск, 2010;
- IEEE Evolving and Adaptive Intelligent Systems 2012, Universidad Carlos III de Madrid, 2012;
- Международная научная конференция «Решетнёвские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2013, 2014, 2015, 2016;
- XIV Научно-техническая конференция ОАО «Транссибнефть», Омск, 2013;
- Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, Москва, 2014;
- Международная научно-практическая конференция «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2014;
- VI Научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики», Тольяттинский государственный университет, 2015, 2016;
- III Международная конференция "Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Approach - AMSA'2015", Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Белокуриха, 2015;
- II Международная научная конференция «Сибирский плацдарм: проблемы и задачи экономического развития Сибири и Красноярского края», Красноярск, 2016;
- Международная конференция «East Siberian Oil and Gas - 2016», Красноярск, 2016;
- Научно-практический семинар «Моделирование и управление в условиях неполной информации, анализ и обработка данных», кафедра системного анализа и исследования операций СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, 2013, 2015, 2016;
- Международная конференция «Нефть и газ Сибири - 2017»,

Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2017;

– VI Международная конференция "Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Approach - AMSA'2017", Сибирский государственный университет науки и технологий, Красноярск, 2017;

– Международный семинар «Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» MIP: Engineering-2019, Красноярск, 2019.

Основные результаты диссертации опубликованы в 42 печатных работах, включая статьи и труды международных и всероссийских конференций, из них 1 монография, 15 статей опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК и 5 проиндексированы в системах SCOPUS и Web of Science. По теме диссертации получены 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ (приведены в Приложении Б).

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 285 наименований, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 323 страницах машинописного текста, содержит 114 рисунков и 9 таблиц.

Глава 1. Проблемы и перспективы повышения эффективности мониторинга и контроля в трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов

1.1. Основные принципы построения систем мониторинга в магистральном трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов

Сеть магистральных трубопроводов нефти и газа является одним из важнейших структурных элементов нефтегазовой отрасли Российской Федерации. Трубопроводная система на сегодняшний день представляет собой основу транспортной инфраструктуры для перекачки нефти, нефтепродуктов и газа как для внутреннего потребления, так и на экспорт. Система магистральных трубопроводов обеспечивает перекачку около 84% транспортируемой нефти [98] и более 90% природного газа. Протяженность магистральной нефтетранспортной системы России составляет 68 тыс. км., газотранспортной - 172,1 тыс. км. [74]. Трубопроводный транспорт по сравнению с другими видами транспорта нефти, нефтепродуктов и газа характеризуется низкими операционными издержками и высокой надежностью.

Перспективы дальнейшего развития трубопроводного транспорта углеводородных ресурсов, а именно нефти и газа не одинаковы. Так, согласно информации отечественных и зарубежных исследователей [59] доля трубопроводного транспорта газа в перспективе будет снижаться по причине бурного развития технологий производства и транспорта сжиженного природного газа (СПГ). Так для транспортировки СПГ целесообразно использование танкерных и железнодорожных перевозок. В то же время, какой-либо значимой альтернативы магистральному трубопроводному транспорту нефти на сегодняшний день не существует.

Представляя собой сложную разветвленную систему, сеть магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов является специфическим объектом, который требует особых подходов к эксплуатации. Со времен становления и

бурного развития трубопроводного транспорта в Советском Союзе и на территории Российской Федерации, сеть магистральных трубопроводов обслуживается централизованно. Еще в 1970 году правительство СССР приняло решение о создании Главного управления по транспортированию и поставкам нефти (Главтранснефть) Министерства нефтяной промышленности, которому было поручено обеспечить прием сырья от нефтепромыслов и доставку его отечественным и зарубежным потребителям [86]. К 1990 году Главтранснефть включала в себя 17 управлений магистральными нефтепроводами, 572 нефтеперекачивающие станции, 265 аварийно-восстановительных пунктов, три специализированных управления по предупреждению и ликвидации аварий, два аварийных поезда. В состав главка входили специализированный трест по диагностике и восстановлению подводных переходов («Подводтрубопровод»), управление производственной связи, проектный институт «Гипротрубопровод».

Ежегодно Главтранснефть обеспечивала перекачку и поставку всей добываемой в СССР нефти (средняя дальность перекачки – 2,3 тыс. км), реконструировала свыше 1 тыс. км магистральных трубопроводов. Общая численность работающих в системе составляла 61 тыс. человек.

Когда СССР исчез с политической карты мира, 15 новых государств разделили между собой общее имущество, в том числе и нефтепроводы. Единая система осталась только в России. Это 48 тыс. км магистралей, 404 насосные станции, резервуарный парк вместимостью 13,2 млн. куб. м. И пока некоторые постсоветские страны стали не без выгоды для себя осваивать роль транзитеров российского сырья, в самой Российской Федерации началась полная реорганизация нефтяной промышленности, включая систему транспортировки нефти. Прекратило свою деятельность профильное министерство, а вместе с ним была ликвидирована и Главтранснефть. Чтобы сохранить единство управления, 16 нефтепроводных предприятий основали компанию «Транснефть», а на базе бывшего аппарата главка – ее исполнительную дирекцию. Лишь производственное объединение магистральных

нефтепроводов Западной и Северо-Западной Сибири, ранее входившее в структуру Главтраснефти, в течение года функционировало как самостоятельное предприятие «Сибнефтепровод».

Учреждение акционерного общества «Акционерная компания по транспорту нефти «Транснефть» произошло 14 августа 1993 года, когда было принято постановление Совета Министров – Правительства Российской Федерации об учреждении компании. Создание компании зафиксировало тот факт, что новые экономические отношения в стране окончательно изменили роль отечественного магистрального нефтепроводного транспорта. Система уже не была посредником между добывающими и перерабатывающими предприятиями, она стала полностью самостоятельной отраслью и одновременно крупнейшей в мире компанией по транспорту нефти.

В 1990-е годы уровень добычи нефти в России упал, поэтому планы по строительству новых магистральных нефтепроводов отсутствовали. Главной задачей отрасли было сохранить и поддерживать в рабочем состоянии уже построенное, обеспечивая готовность к новому этапу роста и развития. Объемы добываемого в стране углеводородного сырья вновь начали увеличиваться с 1999 года, тогда же мощный импульс к развитию получила и ОАО «АК «Транснефть», которое в 2016 году было переименовано в ПАО «Транснефть».

Централизация нефтетранспортной отрасли на протяжении последних пятидесяти лет была необходимой предпосылкой эффективного управления системой магистральных нефтепроводов, имеющих стратегическую важность для народного хозяйства и обороноспособности страны. В рамках главка, а затем и акционерного общества, вырабатывались общие подходы к проектированию, строительству и эксплуатации системы магистральных нефтепроводов. Выстраивалась система подготовки кадров, устанавливались отраслевые стандарты, разрабатывалась рабочая документация, создавались системы диагностики, связи, охраны объектов магистрального трубопроводного транспорта.

В частности, для решения задач *мониторинга технологических и целевых параметров* в магистральном нефтепроводе были созданы различные системы, краткое описание которых приведено далее.

1. Система технологической и оперативно-производственной связи, объединяющая технологические объекты и оборудование магистральных трубопроводов. Сфера коммуникации и связи находится в ведении Акционерного общества «Связьтранснефть», которое было создано на базе Управления эксплуатации производственной связи Главтранснефти и Производственного объединения «Связь», существовавшего в начале 90-х годов. АО «Связьтранснефть» является дочерним обществом ПАО «Транснефть» создано в 1994 г. и выступает в роли единого сетевого интегратора и оператора связи нефтепроводной отрасли [70].

Среди направлений деятельности АО «Связьтранснефть» можно выделить следующие:

- обеспечение всеми видами технологической и оперативно-производственной связи объектов транспорта и добычи нефти в соответствии с правилами технической эксплуатации магистральных нефтепроводов;
- обеспечение технологической и оперативно-производственной связью транспортировку нефти на экспорт;
- развитие и эксплуатация сетей связи: техническое обслуживание, проектирование, строительство и реконструкция, капитальный ремонт, ввод в эксплуатацию;
- эксплуатация и техническое обслуживание систем охранной и пожарной сигнализаций;

Среди приоритетных задач Общества - цифровизация сети связи для создания единого информационного пространства Компании. Кроме того, предприятие нацелено на формирование мультисервисной корпоративной сети и внедрение на ее базе единой ведомственной сети передачи данных, а также сохранение и повышение технологической и эксплуатационной надежности,

отказоустойчивости и эффективности системы технологического управления транспортировкой нефти.

В структуру компании входят филиалы – территориальные производственно-технические управления связи (ПТУС). Всего в ведении АО «Связьтранснефть» и его тринадцати филиалов находится свыше 60 тыс. км линий связи, в том числе кабели связи с металлическими проводниками, радиорелейные линии, волоконно-оптические линии связи.

2. Системы учета, объединяющие средства измерения количественных и качественных показателей перекачиваемой нефти (СИКН). Системы измерений количества и показателей качества нефти находятся в ведении структурных подразделений ПАО «Транснефть» и реализуются в виде узлов учета. Узел учета СИКН – это автоматизированная система учета нефти (нефтепродуктов), которая предназначена для автоматизированных измерений в соответствии с требованиями действующей нормативной документацией (НД) при проведении коммерческого или оперативного учета между принимающей и сдающей сторонами [202].

Основные функции, выполняемые системой измерений количества и показателей качества нефти или нефтепродуктов (на примере СИКН №722 АО «Транснефть – Западная Сибирь»):

- автоматизированное измерение объема и массы брутто нефти в рабочих диапазонах расхода, температуры, давления, плотности, кинематической вязкости с использованием ультразвуковых преобразователей (УЗПР) либо других средств измерения расхода нефти;
- автоматизированное измерение температуры, давления, плотности, кинематической вязкости, содержания серы, объемной доли воды в нефти;
- измерение давления и температуры нефти с помощью показывающих средств измерений давления и температуры нефти соответственно;
- автоматическое вычисление массы нетто нефти, как разности массы брутто нефти и массы балласта, используя результаты измерений массовой доли механических примесей и массовой концентрации хлористых солей в

лаборатории, массовой доли воды, определенной в лаборатории или вычисленной системой обработки информации по результатам измерений объемной доли воды поточным влагомером;

- поверка и контроль метрологических характеристик УЗПР с применением поверочной трубопоршневой установки в автоматизированном режиме;

- защита алгоритма и программы СИКН от несанкционированного вмешательства установкой паролей разного уровня;

- автоматический контроль параметров измеряемого потока, их индикацию и сигнализацию нарушений установленных границ;

- автоматический и ручной отбор проб нефти;

- регистрация и хранение результатов измерений, формирование отчетов.

Обязанности по эффективной эксплуатации СИКН, поддержания их работоспособности, поверке измерительного оборудования возложены на акционерные общества – территориальные структурные подразделения ПАО «Транснефть».

3. Автоматизированная система управления технологическими процессами перекачки нефти. В соответствии с нормами технологического проектирования магистральных нефтепроводов [170] основными целями создания АСУТП магистральных нефтепроводов являются:

- обеспечение транспортирования с заданной производительностью при минимальных эксплуатационных затратах;

- повышение надежности работы нефтепроводного транспорта и предотвращение аварийных ситуаций;

- сокращение потерь при транспортировании и хранении;

- обеспечение качества поставляемых нефтей;

- осуществление оперативного учета материальных и энергетических ресурсов и затрат;

- сокращение (до минимума) времени и объема обслуживания и ремонта нефтепровода.

Комплекс технических средств АСУТП включает:

- вычислительный комплекс совместно с устройствами ввода, представления и регистрации информации;
- устройства телемеханизации насосных станций и линейных сооружений;
- системы локальной автоматики нефтеперекачивающих станций, узлов учета, линейной части, пунктов приема и сдачи;
- средства связи и аппаратуру передачи данных.

4. *Иерархическая система диспетчерского контроля и управления (СДКУ).*

Основной функционал СДКУ [161]:

- оперативный контроль и управление технологическим процессом;
- передача команд управления;
- регистрация и оповещение персонала о событиях и авариях;
- сбор, обработка хранение и визуализация данных;
- обеспечение информационной поддержкой оперативное управление, планирование и контроль производственных процессов;
- разработка, администрирование и конфигурирование процесса управления.

Одной из важнейших функций СДКУ является контроль состояния технологического оборудования линейной части магистрального нефтепровода (ЛЧ МН) и нефтеперекачивающих станций (НПС) из территориального диспетчерского пункта и центрального диспетчерского пункта (ЦДП) [43].

В настоящее время в ПАО «Транснефть» проводятся работы по внедрению единых систем диспетчерского управления (ЕСДУ) в территориальных представительствах. ЕСДУ предоставят возможность

осуществлять централизованный контроль над всей сетью магистральных трубопроводов в регионах присутствия каждого предприятия.

5. *Системы автоматизированного учета расхода электроэнергии* включают в себя две независимые системы: автоматизированную информационно-измерительную систему коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) и автоматизированную систему технического учета электроэнергии (АСТУЭ) [222].

Автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) - иерархическая система, представляющая собой техническое устройство, функционально объединяющее совокупность измерительно-информационных комплексов точек измерений, информационно-вычислительных комплексов электроустановок, информационно-вычислительного комплекса и системы обеспечения единого времени, выполняющее функции проведения измерений, сбора, обработки и хранения результатов измерений, информации о состоянии объектов и средств измерений, а также передачи полученной информации в интегрированную автоматизированную систему коммерческого учета на оптовом рынке электроэнергии в автоматизированном режиме [160].

Автоматизированная система технического учета электроэнергии (АСТУЭ) - это программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий автоматизированный технический учет и планирование потребления электроэнергии, контроль качества электроэнергии, а также мониторинг электротехнического оборудования организаций системы «Транснефть» (ОСТ) с элементами управления электрохозяйством [154].

Первоначально АИИС КУЭ включала в себя только коммерческий учет электроэнергии, остальные функции обеспечивались в АСТУЭ, а именно, технический учет электроэнергии, коммерческий учет тепла, воды, телеизмерения, телеуправление объектами. АСТУЭ как система была функционально перегружена. Затем полностью выделили из АСТУЭ весь учет и перенесли его в АИИС КУЭ. То есть весь объем энергоресурсов, который

потребляют нефтеперекачивающие станции, регистрируется в этой системе. В нее же входит технический учет электроэнергии, контроль качества электроэнергии и сбор информации о потреблении котельно-печного топлива. На базе платформы, используемой в АИИС КУЭ, должно быть создано единое информационное пространство, которое на основе измеренных данных позволит повысить эффективность планирования мероприятий по энергосбережению, даст новые возможности для оптимизации и экономии. АСТУЭ планируется интегрировать в систему диспетчерского контроля и управления (СДКУ) [222].

В настоящее время предприятия системы «Транснефть» нацелены на выполнение требований Энергетической политики компании [220], направленной на сбережение энергетических ресурсов, внедрение новых энергосберегающих технологий, модернизацию средств учета и планирования в энергетической сфере.

Следует отметить, что доля энергозатрат на перекачку составляет порядка 25-30% от общих эксплуатационных расходов [199]. Следовательно, наибольший вклад в экономию топливно-энергетических ресурсов вносит оптимизация технологического процесса перекачки. Это правильный выбор режимов перекачки, своевременная профилактика и очистка трубопроводов, применение противотурбулентных присадок, частотно-регулируемых приводов насосов, своевременная замена энергетического оборудования и многое другое [222].

6. Системы обнаружения утечек нефти (СОУ). В процессе транспортировки нефти и нефтепродуктов по магистральным нефтепроводам неизбежны потери жидкости. Помимо потерь от испарения в резервуарах, утечки жидкости происходят через сальники насосов и запорной арматуры. Такие потери относят к *эксплуатационным*. Однако, на трубопроводах случаются и аварии, сопровождаемые нарушением герметичности внутренней полости магистралей и выходом некоторого количества жидкости наружу. Такие потери относят к *аварийным* [200].

Как правило, аварийные утечки жидкости происходят через отверстия в поверхности трубопровода коррозионного или механического происхождения, а также через некачественные сварные швы, дефекты стыков, трещины и т.д. Кроме того, на ряде трубопроводов существует так называемая «несанкционированная активность», выражающаяся в сооружении криминальных врезок с целью хищения транспортируемой жидкости. Поскольку каждая авария, сопровождающаяся выходом нефти или нефтепродукта из трубы, представляет собой пожарную и экологическую угрозу, устранение последствий которой сопряжено с большими материальными и денежными затратами, то одной из важнейших задач эксплуатации трубопроводов является своевременное обнаружение утечек жидкости с помощью специальных систем обнаружения утечек (СОУ) [200].

Эти системы подразделяют на внешние и внутренние. К внешним СОУ относят системы, которые фиксируют утечку на основе внешних проявлений выход транспортируемого продукта на поверхность грунта или водоема, уровень загазованности, акустические шумы и т.д. К внутренним СОУ относятся системы, в которых используют измерительные приборы, регистрирующие параметры транспортируемой жидкости – датчики давления, расхода, температуры, плотности, а также, вибрации и шумов. Методы, которые применяют в таких СОУ, бывают непрерывного действия, не сопровождающиеся остановкой перекачки (мониторинг давлений и расходов в ключевых сечениях трубопровода), анализ линий гидравлического уклона, методы улавливания волн снижения давления, метод акустической эмиссии и т.д., а также такие, при которых остановка перекачки необходима (построение кривой падения давления при гидравлических испытаниях).

Основным недостатком большей части существующих СОУ является их ограниченная применимость, например, только в стационарных режимах эксплуатации, дискретный характер контроля, низкая помехозащищенность. В связи с этим в современных СОУ используют одновременно несколько методов определения утечек [200].

7. *Системы диагностики состояния магистральных нефтепроводов.* При эксплуатации магистральных нефтепроводов остро стоит проблема обеспечения их надежности и безопасности функционирования [153]. Транспортировка при высоких давлениях больших объемов такого экологически агрессивного продукта как нефть требует особого внимания к вопросам сохранения целостности магистральных нефтепроводов, предупреждению отказов, аварий. Поэтому проблемы обеспечения надежности и безопасности нефтепроводной системы всегда были в центре внимания. Система предупреждения аварий сводилась к периодическим гидравлическим испытаниям трубопроводов повышенным давлением, проведению капитального ремонта линейной части нефтепроводов со сплошной заменой труб или изоляции большими участками. Выбор участков для ремонта производился по ограниченной информации, основанной на визуальных наблюдениях за трассой, осмотре подозрительных мест трубопровода, измерению сопротивления изоляции труб, анализе статистики аварий и т.д. Ежегодно методом сплошного капитального ремонта обновлялось не более 1,5% от общей протяженности магистральных нефтепроводов.

К середине 80-х гг. капитальный ремонт магистральных нефтепроводов с заменой труб достиг рекордных объемов за всю историю отечественного и мирового нефтеснабжения, равных 1,7% от общей протяженности магистральных нефтепроводов СССР. Однако этих мер к началу 90-х годов стало недостаточно для поддержания необходимого уровня надежности и сдерживания нарастающей аварийности. Возраст большинства магистральных нефтепроводов к тому времени составлял 20-25 лет. И к 2005 году прогнозная вероятность аварий на трубопроводном транспорте могла стать критической для экономики страны. К тому же, более половины магистральных нефтепроводов «перешагивали» свой нормативный срок амортизации.

Необходимо было срочно в дополнение к сплошному методу ремонта искать новую эффективную стратегию технического обслуживания, базирующуюся на ремонте трубопроводов по их фактическому техническому

состоянию, то есть брать курс на преимущественное применение выборочного ремонта.

Ключевую роль в определении технического состояния магистральных нефтепроводов должна была сыграть внутритрубная диагностика, которая позволила бы вести сплошное обследование трубопровода и выявлять подавляющее большинство типов дефектов, являющихся причинами аварий и отказов.

Решающий шаг вперёд был сделан в конце 1989 года с принятием Правительством СССР программы по обеспечению надежности магистральных нефтепроводов «Высоконадежный трубопроводный транспорт». Именно этот документ положил начало созданию в апреле 1991 года в г. Луховицы Московской области Центра технической диагностики «Диаскан» [153].

Новым стратегическим направлением обеспечения безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов, снижения аварийности стало сплошное проведение внутритрубной диагностики и выборочный ремонт дефектов по её результатам. В основе концепции – выявление дефектов линейной части трубопроводов с помощью внутритрубной диагностики, оценка технического состояния дефектных участков, определение безопасных режимов эксплуатации на основе данных диагностирования, применение новых эффективных методов ремонта без вывода трубопроводов из эксплуатации и, как результат, продление срока службы магистральных нефтепроводов.

23 апреля 1991 г. был издан приказ о создании Центра технической диагностики в г. Луховицы. Центр технической диагностики (ОАО ЦТД «Диаскан») был создан на правах дочернего предприятия Главтранснефти Миннефтепрома СССР.

Центр технической диагностики был призван решать весь спектр задач по получению первичной информации о состоянии трубопровода, оценке его технического состояния с определением безопасных технологических режимов эксплуатации, необходимости ремонта, а также решению связанных с этим

проблем методического, нормативного, технического и технологического характера.

17 ноября 2014 года в рамках Программы стратегического развития ПАО «Транснефть» (до 21.07.2016 - Открытое акционерное общество «Акционерная компания по транспорту нефти «Транснефть») на период до 2020 года и в целях унификации названий дочерних организаций под брендом «Транснефть» на всей территории России Открытое акционерное общество «Центр технической диагностики» (ОАО ЦТД «Диаскан») было переименовано в Акционерное общество «Транснефть – Диаскан» (АО «Транснефть – Диаскан») [153].

Перечисленные выше системы выстраивались и совершенствовались десятилетиями, однако, некоторые аспекты их работы сопряжены с проблемами, требующими особого внимания, в том числе с позиций совершенствования подходов и средств мониторинга и контроля.

1.2. Анализ проблем существующей системы мониторинга и контроля перекачки нефти в магистральном трубопроводном транспорте в Российской Федерации

Перечень существующих проблем систем мониторинга и контроля систем и оборудования перекачки нефти включает в себя следующие пункты:

- проблемы оперативного обнаружения опасных дефектов оборудования нефтепроводов (в т.ч. линейной части), утечек и незаконных врезок;
- проблемы определения остаточного ресурса оборудования трубопровода на основании анализа циклических нагрузок;
- угрозы несанкционированного доступа и незаконного вмешательства в сети цифровой коммуникации магистральных нефтепроводов;
- проблемы достоверности информации, получаемой с применением средств телеметрии;
- проблемы интеграции измерительных и исполнительных устройств и элементов автоматизированных систем в единый комплекс.

Остановимся на перечисленных проблемах более подробно.

1. *Проблемы оперативного обнаружения опасных дефектов оборудования нефтепроводов (в т.ч. линейной части), утечек и незаконных врезок.*

Одной из наиболее актуальных и сложных проблем эксплуатации магистральных нефтепроводов является проблема обнаружения опасных дефектов, несанкционированных врезок и утечек, предотвращения разливов нефти и хищений нефти из магистральных трубопроводов. Требуется избежать нежелательных последствий, которыми являются загрязнение окружающей среды, экономические потери, включая штрафы за загрязнение природной среды, затраты на ликвидацию повреждений оборудования, вследствие этого упущенная выгода и увеличение сроков доставки нефти потребителям.

Для решения указанной проблемы используется более чем двадцатилетний опыт ПАО «Транснефть», в основу которого положена *внутритрубная диагностика (ВТД)*. При этом основным методом контроля за находящимися в эксплуатации трубопроводами является сканирование их внутренней поверхности с использованием *внутритрубных инспекционных приборов (ВИП)*.

Среди методов внутритрубной инспекции применяют следующие:

- профилометрия – выявление вмятин, гофров и овальностей,
- ультразвуковая дефектоскопия – выявление коррозионных дефектов, риск, расслоений, задир и царапин, трещиноподобных дефектов в металле трубы и сварных швах,
- магнитная дефектоскопия – выявление дефектов сварных швов,
- навигационный контроль пространственного положения трубопровода с измерением радиусов изгиба, перемещений и координат оси трубопровода.

Часто используют комбинации различных методов диагностики, например, магнитной и ультразвуковой дефектоскопии.

Контроль со стороны наружной поверхности проводится по результатам внутритрубной диагностики для дополнительной проверки и уточнения

параметров дефектов перед проведением ремонта трубопровода. В рамках *дополнительного дефектоскопического контроля (ДДК)* [200].

Кроме перечисленных методов контроля состояния и целостности линейной части магистрального нефтепровода внедряются новые методы. Так для решения задачи обнаружения несанкционированной активности в охранной зоне нефтепроводов, заблаговременного предотвращения незаконных врезок может использоваться как визуальный контроль, включая видеонаблюдение и наблюдение с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), так и различные системы мониторинга физических полей, включая лазерные системы (контроль пересечения лазерного луча) и сейсмические / виброакустические системы (контроль вибрации). Последние, в свою очередь, могут использовать различные типы датчиков вибрации: дискретные датчики (геофоны, пьезодатчики) или распределённые датчики (электрический или оптоволоконный кабель) [77].

Системы мониторинга, использующие в качестве чувствительного элемента оптоволокно, активно развиваются в настоящее время. Это один из наиболее перспективных типов систем мониторинга протяжённых объектов. К их преимуществам относится возможность использования уже проложенного кабеля, отсутствие активного оборудования на линии, отсутствие промежуточных пунктов электропитания, скрытая установка, слабая зависимость от погодных условий и электромагнитных полей, минимальное обслуживание. Теоретические основы работы таких систем были заложены более 20 лет назад в работах зарубежных и отечественных специалистов [271].

В системах мониторинга на основе когерентного рефлектометра, оптическое волокно используется как распределённый датчик вибрации. Рефлектометр периодически посылает в волокно короткие оптические импульсы и анализирует отражённый сигнал (рефлектограмму). При механической или акустической активности вблизи от кабеля, вибрация передаётся волокну, что вызывает изменения в рефлектограмме. По этим изменениям можно с высокой точностью определить место воздействия [151].

В качестве распределенного датчика (канала передачи) вибрации может выступать сам нефтепровод. Этот принцип лежит в основе перспективных виброакустических систем диагностики линейной части, резервуаров и насосного оборудования [188], [262], [284], сопряженных со средствами частотного и фазового анализа сигналов на основе статистического и интеллектуального подходов.

2. Проблемы определения остаточного ресурса оборудования трубопровода на основании анализа циклических нагрузок.

Магистральные нефтепроводы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклически изменяющихся нагрузок, работают в условиях нестабильных режимов, что приводит к усталостным повреждениям.

В частности, одним из наиболее значимых видов усталостного нагружения на магистральных нефтепроводах является малоцикловое воздействие. Малоцикловое разрушение происходит при значительном количестве перепадов давления или внешней нагрузки (от ста до десятков тысяч). Такое разрушение весьма характерно для длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. Причинами малоцикловых разрушений являются перепады давления, наличие дефектов и повреждений, конструктивных концентраторов напряжений.

Цикличность нагружения участка магистрального нефтепровода определяется на основе данных по количеству включений насосных агрегатов НПС на технологическом участке и величины изменений (перепадов) внутреннего давления на выходе нефтеперекачивающих станций при этих включениях [47].

Изучение особенностей периодичности циклического нагружения линейной части нефтепровода совместно с характером изменения нагрузок и их амплитуды является важной научно-технической проблемой, решение которой окажет существенное влияние на повышение эффективности и безопасной эксплуатации оборудования системы магистральных нефтепроводов.

3. Угрозы несанкционированного доступа и незаконного вмешательства в сети цифровой коммуникации магистральных нефтепроводов.

Усложнение систем мониторинга и управления магистральными нефтепроводами сопровождается ростом и усложнением цифровых систем связи и коммуникации диагностического, измерительного и управляющего оборудования нефтепровода. На предыдущем этапе системы связи были переведены на оптоволоконные технологии, позволившие повысить скорость передачи данных в системах связи, приблизиться к реализации принципов мониторинга и управления в режиме реального времени.

Однако рост информационной инфраструктуры, усложнение цифровых коммуникаций сопровождается расширением угроз, связанных с возможностью несанкционированного вмешательства в вычислительные узлы и сети коммуникации.

Структуры безопасности ПАО «Транснефть» зафиксировали рост количества кибератак на информационные системы, технологические сети связи и другие информационные и технологические ресурсы компании за девять месяцев 2017 г. по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Для защиты инфраструктуры от нападений компания формирует центр компьютерной безопасности, который работает во взаимодействии с Государственной системой обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак (ГосСОПКА), а также предлагает своевременно разрабатывать подзаконные акты, предусмотренные Федеральным законом №187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 г [204].

Один из таких подзаконных актов должен утвердить показатели критериев значимости объекта критической информационной инфраструктуры (КИИ), их значения, а также порядок и сроки осуществления их категоризации. Однако анализ этого проекта показал, что его прямое применение затруднительно. Нет методики, по которой рассчитываются значения

показателей для присвоения объектам КИИ соответствующих категорий. А это создает риски некорректного определения значимости таких объектов. Требуется оценка технических и правовых последствий реализации норм данного федерального закона.

Киберпреступность - это один из самых значительных рисков в перспективе следующих 10 лет. В первом полугодии 2017 г. около трети всех атак в мире пришлось на автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). В 2017 г. появился новый вид вредоносного ПО - вымогатели для программируемых логических контроллеров, способные заразить целый ряд моделей и устройств крупнейших производителей АСУ ТП. Для организаций «Транснефти», эксплуатирующих подобное оборудование, эти вредоносные системы особенно опасны. Они могут навредить внутренним процессам [196].

Кибератакам подвергаются информационные носители, ИС, технологические сети связи. За первые три квартала 2017 г. по сравнению с аналогичным периодом прошлого года количество электронных писем с нежелательным содержанием - вирусами и др. - увеличилось на 60%, до 10 млн. Выросло и количество попыток несанкционированных соединений с центром обработки данных «Транснефти». Кроме того, руководителям и работникам поступают анонимные электронные сообщения с угрозами, мошенники вымогают деньги. В компании зафиксированы случаи добычи криптовалюты на служебном оборудовании. Майнинг способен помешать технологическим процессам в компании [196].

Все это вызывает в компании серьезную озабоченность. На самом деле, ее деятельность затрагивает все НПЗ, экспорт нефти и нефтепродуктов. И если учесть, что «Транснефть» - это монополия, которая транспортирует нефть от Находки до Балтики, важность этого вопроса очевидна.

По данным «Транснефти», в 2016 г. на российские информационные ресурсы было совершено более 50 млн. атак, что в три раза больше, чем в 2015 г. Более 60% всех нападений производится из-за границы. Причем в 2017 г.

количество атак вновь значительно возросло. Основными объектами кибератак в топливно-энергетическом комплексе становятся АСУ ТП, ИТ-ресурсы и сети передачи данных. Кстати, в «Транснефть» работает более 100 корпоративных информационных систем и баз данных, более 5000 АСУ ТП, создано свыше 60 тыс. автоматизированных рабочих мест. Именно поэтому компания нуждается в киберзащите.

В июле 2017 г. «Транснефть» актуализировала политику информационной безопасности и утвердила программу противодействия угрозам. Политика предусматривает внедрение современных средств защиты от целенаправленных атак, создание централизованной системы мониторинга и управления событиями информационной безопасности. Она будет собирать информацию из разных источников и распознавать сложные и целевые атаки. В июле 2017 г. в «Транснефти» появилась рабочая группа по противодействию кибератакам. Кроме того, в компании уже созданы подразделения информационной безопасности. На полигоне центра испытаний и эксплуатации происходит тестирование создаваемых систем на их соответствие требованиям компании, проверяется их уровень кибербезопасности [196].

Почти во всех информационных системах и АСУ ТП применяется программное обеспечение иностранного производства. Причем у представителей структур безопасности нет полной уверенности в отсутствии в этом программном обеспечении недекларируемых возможностей.

Зачастую иностранное оборудование не совместимо с отечественными средствами защиты информации. Например, компании пришлось отказаться от оборудования европейского вендора Schneider Electric из-за его уязвимости для внешних кибератак. В 2016-2017 гг. «Транснефть» провела анализ рисков в части информационной безопасности АСУ ТП и обнаружила многочисленные критичные уязвимости, в том числе и во встроенных механизмах защиты АСУ ТП. Пока «Транснефть» вынуждена комбинировать отечественные и иностранные программно-аппаратные решения, так как полностью

законченного комплексного решения для кибербезопасности от российского производителя на сегодняшний день не существует.

4. Проблемы достоверности информации, получаемой с применением средств телеметрии.

Вместе с проблемами безопасности цифровой инфраструктуры систем автоматизированного управления и мониторинга существенную важность имеют проблемы достоверности информации, получаемой со средств измерения. Компания эксплуатирует измерительное оборудование различных производителей, которое отличается по своим метрологическим характеристикам. Эта проблема отчасти является следствием непрерывного роста компании, развития и совершенствования технологий, включая технологии измерения, контроля и мониторинга. Другая причина, характерная для современной ситуации в компании – закупка оборудования, комплектующих и расходных материалов по итогам конкурсных процедур. В этих условиях зачастую невозможно заранее предугадать, кто из потенциальных поставщиков выиграет конкурс.

В качестве примера можно привести ситуацию с датчиками измерения давления линейной части нефтепровода, которые могут быть выпущены различными производителями и иметь различные метрологические характеристики, не смотря на то, что они установлены в единую измерительную систему в рамках одного технологического участка магистрального нефтепровода [38].

Сложность системы телеметрии, ее протяженность приводят к тому, что не всегда существует возможность в кратчайшие сроки заменить вышедший из строя датчик. В таких условиях необходимо предусмотреть возможности прогнозных оценок показаний средств измерения в период их неисправности до момента ремонта или замены.

5. Проблемы интеграции измерительных и исполнительных устройств и элементов автоматизированных систем в единый комплекс.

Традиционно средства мониторинга и управления магистральных нефтепроводов принадлежат различным по назначению системам. Например, учет нефти и нефтепродуктов подразделяют на оперативный (реализуется средствами системы диспетчерского контроля управления) и коммерческий (осуществляется системами измерения количества и контроля качества). Измерительные системы, входящие в них не только не пересекаются, но и имеют разные требования по точности измерений [38].

В состав средств СДКУ редко включают приборы измерения объемного или массового расхода, поточные измерители плотности и т.д. С другой стороны, СИКН, исходя из своего назначения и стоимости, обусловленной высокими требованиями к точности и набору измеряемых параметров, расположены на значительном удалении друг от друга и не могут использоваться при принятии оперативных решений на уровне диспетчерского контроля [38].

Системы регулирования насосными агрегатами работают, как правило, независимо от систем сглаживания волн давлений, что нарушает системность работы нефтепровода и приводит к противоречивости в алгоритмах управления этих двух разновидностей систем.

Традиционно сформировавшаяся «мозаичность» средств мониторинга и контроля является заметным препятствием к дальнейшему совершенствованию подходов к повышению эффективности и безопасности эксплуатации оборудования нефтепровода.

В перспективе требуется переосмысление и выработка новых подходов к интеграции средств контроля, мониторинга и управления на базе новой методологии на основе достижений в области интеллектуальных технологий обработки данных измерений и построения прогнозных моделей процессов, протекающих в нефтепроводе.

1.3. Технические и программно-алгоритмические средства планирования технологических режимов в трубопроводном транспорте нефти

Технологическим режимом в соответствии с действующим регламентом компании «Транснефть» [155] называют документально оформленный порядок взаимодействия насосного оборудования, трубопроводных систем, резервуарных парков, систем энергоснабжения и автоматики, обеспечивающий безопасную перекачку нефти с требуемой производительностью.

Режимы разрабатываются отделом главного технолога в соответствии с утвержденными планами транспортировки нефти, как правило, на годовой период. Карты технологических режимов используются диспетчерской службой при управлении магистральным нефтепроводом с обеспечением плановой и безопасной работы технологических участков нефтепровода.

Почасовые режимы работы магистрального нефтепровода служат основой для планирования электропотребления для насосных агрегатов. Таким образом, процедуры планирования и ведения технологических режимов оказывают огромное влияние на энергоэффективность при эксплуатации магистрального нефтепровода.

Разработка технологических режимов сопряжена с гидравлическим расчетом с учетом изменяющейся реологии нефти, уровней взлива в резервуарах, графиком движения внутритрубных средств очистки и диагностики. В результате расчета определяются планы переключений насосных агрегатов, задвижек, уставок регуляторов давления, частотных регуляторов привода и так далее.

При рассмотрении магистрального нефтепровода как объекта при расчете технологических режимов удобно представлять его как сложную систему с перестраиваемой структурой и изменяющимися параметрами. Рассмотрим схематическое представление входных и выходных параметров магистрального нефтепровода (рисунок 1.1) [197], [1].

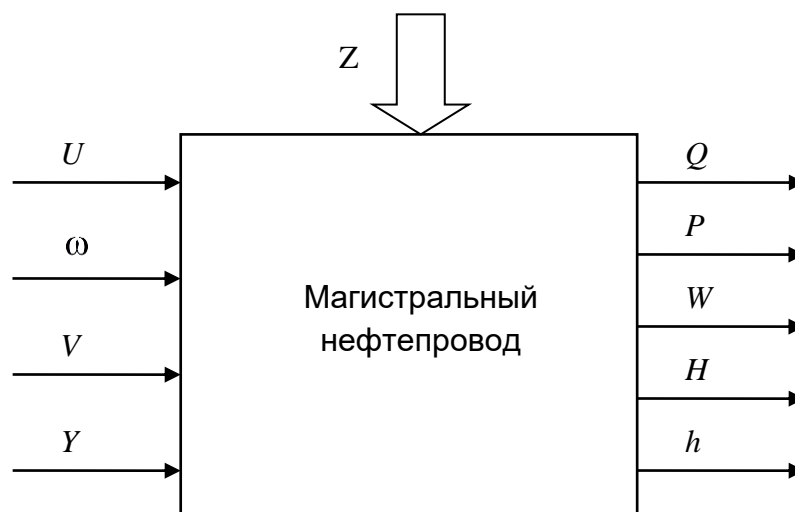


Рисунок 1.1. Схематическое представление входных и выходных параметров магистрального нефтепровода

Входными параметрами рассматриваемой системы являются:

U – команды на включение/выключение насосных агрегатов, находящихся на нефтеперекачивающих станциях; ω – задание частоты вращения насосов на НПС; V – команды на открытие/закрытие секучих задвижек, установленных на линейных участках; Y – физические характеристики перекачиваемой нефти, такие как плотность, вязкость, получаемые в результате лабораторного анализа.

В качестве дополнительных факторов, влияющих на технологический процесс (Z), необходимо рассматривать также изменяемую конфигурацию трубопроводной сети, типы используемых насосов и варианты их включения, характеристики внешней среды, такие как температура окружающего воздуха или грунта. Существуют также ненаблюдаемые факторы, такие как техническое состояние оборудования, влияние отложений в трубопроводе и т.д.

Выходными параметрами системы выступают: Q – производительность перекачки нефти; P – значения давлений в заданных точках магистрального нефтепровода; W – электроэнергия, потребляемая насосными агрегатами; H – напоры, создаваемые нефтеперекачивающими станциями; h – потери напора на линейных участках.

Методика гидравлических расчетов документально определена для стационарных (установившихся) технологических режимов [155]. При этом наибольшую потенциальную опасность несут нестационарные (переходные) режимы, сопряженные с запуском, остановкой перекачки, а также переходом с одного установившегося технологического режима на другой. Опасность неустановившихся процессов связаны с риском возникновения кавитационных процессов и гидроударов. Руководящими документами «Транснефти» [155] определены максимальное количество и длительность переходных процессов в течение суток.

Методика расчета нестационарных режимов определена в документе [171]. Расчет переходных технологических режимов сопряжен с большим объемом вычислений и не возможен без применения специального алгоритмического и программно-технического обеспечения. Общепринятый на сегодняшний день подход, применяемый в алгоритмах расчета, базируется на вычислительных процедурах решения дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы теплопереноса в системе «труба - жидкость» при заданных начальных и граничных условиях. Для создания таких расчетных алгоритмов широко применяются методы научной дисциплины «вычислительная гидродинамика».

В некоторых подразделениях ПАО «Транснефть» с целью расчетов неустановившихся режимов применяется разработка компании «Энергоавтоматика» - пакет Cassandra [123], а также Synergi Pipeline Simulator [277]. За рубежом широкое распространение получили программные продукты компаний Comsol [264], Emerson [265] и другие.

Расчеты с применением программного обеспечения, реализующего методы вычислительной гидродинамики, эффективны лишь отчасти. Проблемы могут вызвать следующие причины:

- неопределенность реологических характеристик перекачиваемой жидкости. Нередко встречается недостаток поточных измерителей плотности,

вязкости для оперативного их учета или их отсутствие при фактическом варьировании этих параметров в пределах, достигающих 10% и более [43];

- сложность внутренней геометрии трубопровода, включая изгибы трубы, неидеальность внутреннего профиля, наличие множества объектов, оказывающих внутреннее сопротивление;

- варьирование упругих характеристик трубопровода в зависимости от координаты;

- наличие растворенных газов в нефти, что существенно влияет на характеристики ее сжимаемости;

- возникновение несплошностей потока транспортируемой жидкости;

- дрейф и, как следствие, неопределенность характеристик насосных агрегатов;

- вынужденное использование упрощенных гидродинамических моделей, выведенных с применением линеаризации, применения постоянных коэффициентов и т.д.

Приведенный здесь список включает только основные факторы неопределенности, который можно продолжать.

В этих условиях использование в расчетном алгоритмическом и программном обеспечении исключительно упрощенных (усредненных) гидродинамических моделей приводит к значительным погрешностям, следствием которых может стать снижение надежности и энергоэффективности эксплуатации нефтепровода.

1.4. Возможности модернизации средств контроля и диагностики с целью энергоэффективной и безаварийной эксплуатации магистральных трубопроводов

В настоящей работе предлагается комплекс мер, позволяющих по-новому подойти к проблеме мониторинга и диагностики при перекачке нефти по магистральным нефтепроводам с использованием прогнозного моделирования.

Ниже кратко опишем подходы, применение которых предлагается в диссертации и которые предлагается применять для повышения эффективности эксплуатации оборудования магистрального нефтепровода.

1. *Применение адаптивных непараметрических моделей для описания статических и динамических систем магистрального нефтепровода.* В подавляющем случае реальных задач, связанных с построением моделей, в т.ч. с целью мониторинга технологических параметров и прогнозирования, исследователь обладает недостаточной информацией об объекте. В частности, отсутствует структура модели в виде функции или оператора, известного с точностью до набора параметров. Дополнительно предполагается изменчивость объекта, что приводит к дрейфу / коррекции его модельного математического описания. В этом случае целесообразно воспользоваться аппаратом непараметрических адаптивных методов моделирования. В работе представлено несколько разновидностей таких моделей, в результате серии численных экспериментов показана их работоспособность, доказаны теоремы об их асимптотической сходимости.

Адаптивные непараметрические модели пригодны для описания процессов выбега центробежных насосов, а также, процессов нагрева электрических поточных нагревателей.

2. *Привлечение многосвязных комбинированных моделей к описанию процессов потокораспределения в трубопроводных сетях.* Задача распределения потоков в гидравлических сетях имеет важное значение для описания процессов в магистральном нефтепроводе. Особенное внимание имеет случай, когда характер потока в сегменте, входящем в трубопроводную сеть, неизвестен заранее, а сама сеть достаточно сложная. В этом случае система уравнений, составленная в соответствии с законами Кирхгофа для гидравлических сетей не может быть определена с точностью до параметров. Более того, нелинейную систему уравнений достаточно непросто решить с использованием численных методов по причине вычислительной сложности и возможной неустойчивости метода последовательных приближений.

Обе перечисленные проблемы могут быть решены с использованием адаптивных комбинированных многосвязных моделей, предлагаемых в работе. Решение системы уравнений предваряется либо заменяется его статистической оценкой, при этом некоторые уравнения в системе могут быть заменены их непараметрическими аналогами.

3. Использование гибридных моделей в процессе выявления неработающих датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода и прогноз их показаний. Проблема при эксплуатации датчиков давления на линейной части нефтепровода сопряжена с высокой вероятностью их выхода из строя. Протяженность трубопровода затрудняет их немедленную замену, что, тем не менее, предусмотрено руководящими документами. Предлагается до момента замены неисправного датчика прогнозировать его показания, основываясь на предположении о линейности распределения напоров между двумя нефтеперекачивающими станциями, совместно с анализом показаний соседних датчиков и корректировке прогнозного значения с учетом доступной информации.

Гибридная модель в данном случае аккумулирует априорную информацию о характере линии гидроуклона и использует текущие измеренные данные с других датчиков с целью коррекции прогнозного значения давления. Предложенная технология работы с информацией позволяет диагностировать выход из строя датчика в автоматическом режиме, подавая соответствующий сигнал в системе диспетчерского контроля и управления до того момента, когда диспетчер заметит этот факт самостоятельно. Особенно полезен предлагаемый подход в случае, если отклонение показаний неисправного датчика от истинных значений измеряемого давления относительно мал. Также, исходя из перечисленных свойств, предложенный алгоритм может эффективно работать совместно с программно-аппаратными средствами системы обнаружения утечек.

4. Синтез имитационных моделей неустановившегося течения в магистральном нефтепроводе. Как было отмечено ранее, существует

множество программных средств, позволяющих рассчитывать состояние трубопровода в терминах его основных распределенных параметров: давлений, скоростей потока и температур, в том числе в условиях неустановившихся режимов работы. Программные продукты в большинстве своем опираются на модели вычислительной гидродинамики, а значит, для своей работы требуют достаточно полной информации о внутренней геометрии трубопровода, включая диаметры, шероховатость; высотном профиле трубопровода; толщинам стенок и материале труб; конфигурации и характеристиках насосных агрегатов, средств регулирования, включая систему сглаживания волн давления; расположении местных сопротивлений, таких как фильтры-грязеуловители, клапаны, дроссели; и так далее. Проблема заключается в том, что, не смотря на многолетний опыт, наличие подробной проектной документации, результатов диагностики, информация о процессах в трубопроводе сопровождается существенной неопределенностью.

В качестве примера можно привести неопределенность характеристик магистральных насосных агрегатов. Насосные агрегаты выпускаются заводом-изготовителем и сопровождаются документацией, включающей в себя расходо-напорные характеристики, характеристики КПД, охватывающие рабочий диапазон параметров насоса, измеренные, как правило, на воде. Пересчет характеристик с воды на вязкую нефть доступен в справочниках и руководствах, например [201] и других. Однако, в процессе эксплуатации, после многочисленных ремонтов, характеристики насосов более не соответствуют исходным (расчетным). Более того, опыт эксплуатации показывает, что эти характеристики дрейфуют. Таким образом, текущее состояние центробежного насоса не всегда известно, его характеристики требуют постоянного уточнения в процессе эксплуатации.

Интересный факт заключается в том, что некоторые разработчики моделей *сознательно* упрощают вид моделей, пытаясь компенсировать существующие факторы неопределенности и ускорить процесс прогнозирования.

В настоящем исследовании предпринята попытка представить альтернативный подход к построению динамических распределенных моделей на базе программного обеспечения Matlab. Невозможность построения моделей напрямую из готовых модулей из-за влияния неопределенностей и неучтенных факторов привела к необходимости дополнительных настроек модели. Таким образом, полученная модель уже не описывала досконально детали гидравлических процессов с применением частных моделей, а представляла собой *макромодель*, претерпевшую изменения в результате настройки ключевых параметров, в целом приводящим к новому содержанию полученной модели. Среди новых допущений в модели пришлось работать с гипотезой «сжимаемой нефти», невозможности разделения упругих характеристик нефти и трубы и так далее.

Таким образом, опыт, полученный в результате построения модели описания неустановившихся процессов в трубопроводе, может быть использован для повышения эффективности систем прогноза и управления при эксплуатации магистрального нефтепровода, как сложной распределенной системы, функционирующей в условиях неопределенности.

Выводы по главе 1

В главе представлен анализ особенностей работы систем диагностики и прогнозирования при эксплуатации сложного распределенного технического объекта, которым является современный магистральный нефтепровод.

Исходя из результатов анализа, был предложен комплекс подходов, позволяющих по-новому взглянуть на средства, используемые при анализе информации в средствах контроля и автоматизированного управления оборудованием магистрального нефтепровода.

В качестве основного способа повышения эффективности средств, диагностики, контроля и управления предлагается совершенствование моделей,

позволяющих более эффективно обрабатывать измеренные данные в системах контроля и диагностики.

В основе предлагаемого подхода лежит активное применение методов имитационного моделирования совместно с технологиями работы с результатами измерений технологических параметров в условиях неопределенности, а именно, интеллектуальных и непараметрических методов обработки данных.

Вместо простого следования принципу *агрегирования* моделей, при котором каждая модель привносит свои погрешности в процедуры расчета, предлагается придерживаться подходов, позволяющих в процессе мониторинга опираться на измеренные данные, в некоторых случаях учитывая доступную априорную информацию. Таким образом, предлагается от комплекса взаимодействующих частных моделей приблизиться к «макросинтезу» общей модели рассматриваемого объекта.

Априорная информация в предлагаемых подходах содержит фундаментальные закономерности, связанные с природой магистрального нефтепровода и процессов, протекающих в нем. Например, в случае мониторинга распределения потоков в разветвленной трубопроводной сети такой информацией будет топология этой сети, а также законы сохранения. В случае прогноза показаний неисправных датчиков линейной части нефтепровода в качестве априорной информации принимается близость линии гидроуклона к прямой.

Глава 2. Адаптивные непараметрические методы и алгоритмы построения прогнозных моделей

2.1. Адаптивный подход к задаче идентификации дискретно-непрерывных объектов

В теории и практике анализа данных существует обширный класс задач *мониторинга и прогноза* процессов и технологических параметров сложных технических объектов. Эти задачи решаются с целью управления объектами, обеспечения их безаварийной работы, оптимизации технологических режимов и экономии потребляемых ресурсов. Инструментарий, применяемый для решения задач мониторинга и прогноза, зависит от типа рассматриваемого объекта, его фундаментальных свойств и другой доступной информации об объекте.

Решение любых задач сбора и анализа данных, в том числе и задач мониторинга и прогноза, сводится к построению *модели* объекта. Методология построения математических моделей объектов различной природы входит в предмет *теории идентификации* [66], [67], [120], [164], [166], [184], [186].

Поясним суть идентификации следующей схемой (рисунок 2.1).

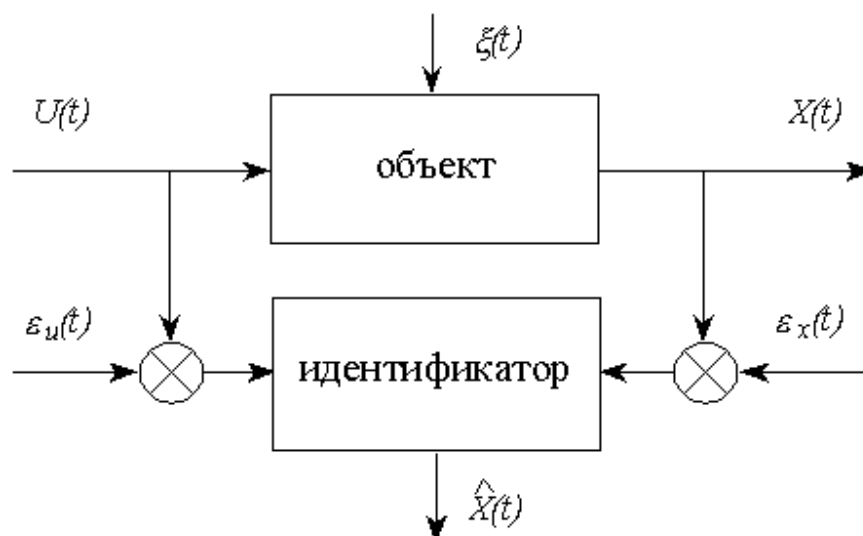


Рисунок 2.1. Схема идентификации объекта

Моделью назовем некоторый оператор, позволяющий осуществлять прогноз выходной величины объекта $X(t)$ по значению входного воздействия $U(t)$. Процесс построения модели объекта происходит в условиях действия случайных помех в каналах измерения входных и выходных величин: $\varepsilon_u(t)$ и $\varepsilon_x(t)$, а также наличия ненаблюдаемых случайных возмущений $\xi(t)$, действующих на объект идентификации. Случайные помехи в каналах измерения принимаются несмещёнными и имеющими ограниченную дисперсию. Качество идентификации определяется критерием, представляющим собой средний квадрат отклонения выходной величины объекта от величины, прогнозируемой моделью. Оптимальную модель \hat{X} отыскивают из условия минимизации критерия качества:

$$M \left\{ [X(t) - \hat{X}(t)]^2 \right\} \rightarrow \min_{\hat{X}(t)}. \quad (2.1)$$

В процессе оптимизации в модели может варьироваться структура, параметры, кроме того, может происходить перебор различных предположений о природе и свойствах моделируемого объекта.

Выбор того или иного метода идентификации зависит от уровня *априорной информации* об исследуемом объекте, и чем больше неопределённость, тем сложнее с ним работать. Априорная информация об исследуемом объекте, необходимая для математической формулировки задачи, складывается из информации о его операторе, случайных помехах и возмущениях, о функции цели и ограничениях [104]. На практике, как правило, приходится сталкиваться со случаем неполноты априорной информации об исследуемом объекте.

Выделяют следующие уровни априорной информации, в зависимости от степени её полноты [104], [127]:

1 *Байесов уровень с максимально возможной информацией.* Он характеризуется наличием информации о случайных помехах и модели процесса, которая известна полностью. Точно известны статистические

характеристики помех, в том числе численные значения параметров их распределений, а также точно известна модель процесса.

2 *Байесов уровень*. Он предполагает наличие информации о случайных помехах и модели процесса с точностью до набора параметров (от предыдущего уровня он отличается тем, что неизвестны численные значения параметров плотностей вероятностей помех и модели). Входные и выходные переменные объекта наблюдаются в виде статистических выборок конечного или бесконечного объема из генеральной совокупности независимых, одинаково распределённых случайных величин, плотность распределения которых также задана с точностью до набора параметров.

3 *Уровень параметрической неопределённости*. Структура модели известна с точностью до набора параметров, а сведения о законе распределения помех отсутствуют. Входные и выходные переменные наблюдаются в виде статистических выборок конечного или бесконечного объема из генеральной совокупности независимых, одинаково распределённых случайных величин, плотность распределения которых неизвестна.

4 *Уровень непараметрической неопределённости*. Неизвестна параметризованная структура модели, но известны некоторые качественные свойства объекта (например, статический объект или динамический, однозначны или нет его характеристики и т. д.). Сведения о законе распределения помех отсутствуют, входные и выходные наблюдения объекта осуществляются аналогично уровню параметрической неопределённости.

Естественно полагать, что каждому уровню априорной информации соответствует соответствующая ему методология построения моделей. В частности, подавляющее большинство использующихся в настоящее время методов построения моделей относятся к классу методов *идентификации в узком смысле* и разработаны для параметрического уровня априорной информации. Среди этих методов можно назвать широко применяемые на практике *методы наименьших квадратов* и *стохастической аппроксимации* [175], [210]. Идентификация в узком смысле предполагает знание структуры

модели с точностью до набора параметров. Однако, если эта информация отсутствует, её отсутствие необходимо восполнить, проводя процедуру *структурной идентификации* [212], либо использовать класс методов *идентификации в широком смысле* [127], [212].

Определим *адаптацию* как способ восполнения недостающей априорной информации об объекте в процессе построения или уточнения его модели. Исследованию явления адаптации и адаптивных методов анализа данных посвящено множество исследований. Стоит отметить, например, классические работы А.А. Фельдбаума [205], Я.З. Цыпкина [210], [211], Н.С. Райбмана [165], Л.А. Растрюгина [169] посвящённые адаптивным методам в анализе данных.

Непрерывным условием адаптации является возможность получения так называемой *текущей информации* об объекте. Как правило, текущая информация представляет собой измерения переменных (входных и выходных), характеризующих состояние или поведение объекта. Подавляющее большинство технических объектов относятся к классу *дискретно-непрерывных*. В этом случае текущая информация о непрерывном объекте доступна в виде дискретных измерений переменных.

Типичная схема идентификации дискретно-непрерывного объекта показана на рисунке 2.2 [128], [1].

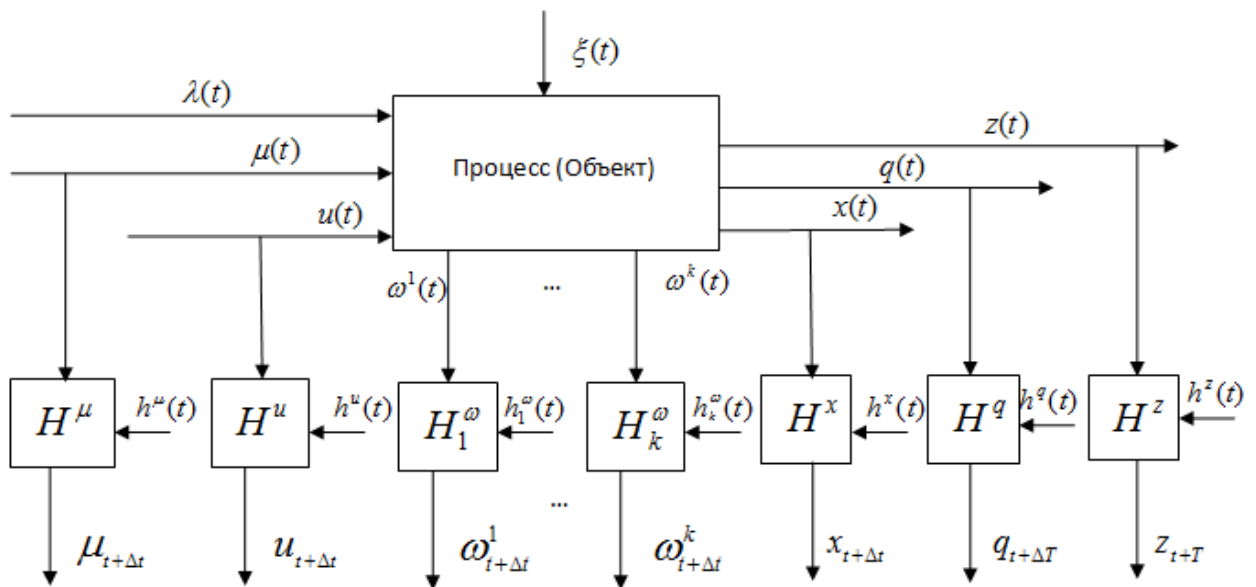


Рисунок 2.2. Схема идентификации дискретно-непрерывного объекта

Выходные переменные $z(t)$, $q(t)$ и $x(t)$ контролируются (измеряются) через различные по величине интервалы времени Δt , ΔT и T соответственно ($T > \Delta T > \Delta t$). На рисунке 2.2 соответствующие измерительные блоки обозначены преобразователями H . Особенностью процесса измерения переменных является то, что измеренное значение выхода объекта станет известным только через определённые промежутки времени, этим объясняется запаздывание в измерениях выходных переменных объекта $z(t)$, $q(t)$ и $x(t)$. Выходные переменные $x(t)$ контролируются достаточно часто с помощью различного рода индукционных, емкостных и других датчиков, $q(t)$ – значительно реже на основе лабораторных анализов, а $z(t)$ – в результате длительного химического анализа, физико-механических испытаний и других. Связь выходных переменных от входных и дополнительной информации $\omega(t)$ может быть представлена следующим оператором [128], [1]:

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), \lambda(t), \xi(t), t). \quad (2.2)$$

С практической точки зрения для исследуемого процесса наиболее важным является контроль переменных $z(t)$. Прогноз важной целевой переменной $z(t)$ по часто измеряемым выходным переменным $x(t)$ и $q(t)$ совместно с входными $u(t)$, $\mu(t)$ и дополнительными переменными $\omega(t)$ является актуальной проблемой при анализе многих сложных технических объектов.

Для сбора текущей информации и построения моделей дискретно-непрерывных процессов используют *информационно-моделирующие системы* (ИМС) [55]. ИМС состоит из четырех блоков: общения, обработки данных, хранения данных с базой данных (БД) и математического моделирования (рисунок 2.3).

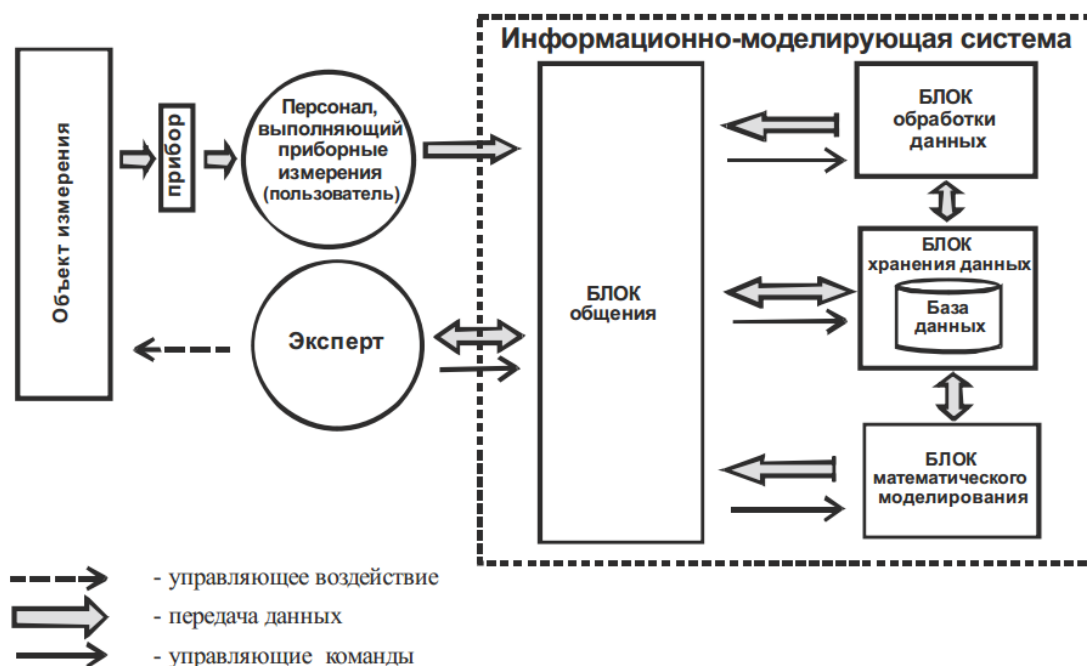


Рисунок 2.3. Структурная схема информационно-моделирующей системы

Блок общения предназначен для ввода и визуализации данных, обеспечения взаимодействия пользователя-эксперта с блоками математического моделирования, обработки и хранения данных. *Блок хранения данных* позволяет записывать и считывать необходимые данные из базы данных (БД). В БД хранятся результаты приборных измерений с привязкой к месту и времени измерения, пространственные параметры и характеристики измеряемого объекта, а также другие необходимые для расчетов параметры. *Блок обработки данных* позволяет формировать выборки из БД в соответствии с заданными критериями, а также производить необходимые расчеты с использованием хранимых в БД параметров объекта измерения. *Блок математического моделирования* служит для формирования модели по имеющейся информации из БД в соответствии с предпочтениями эксперта [55].

Подводя итог, необходимо отметить, что процесс построения адаптивных моделей дискретно-непрерывных объектов в условиях неполноты априорной информации является сложной задачей, требующей для её решения выработки соответствующей методологии, создания соответствующих алгоритмических и

программно-технических средств в составе информационно-моделирующих систем.

2.2. Непараметрические методы идентификации статических объектов. *H*-аппроксимация

Среди методов идентификации объектов различной природы в условиях, когда априорная информация соответствует непараметрическому уровню, можно выделить метод локальных аппроксимаций, базирующийся на использовании функционалов от оценок плотности распределения вероятности Розенблатта-Парзена [263], [267]. Функция оценки плотности распределения Розенблатта-Парзена основана на учете локальных свойств случайной величины по её выборочным значениям в «зоне покрытия» ядра. Пусть доступна выборка независимых наблюдений случайной величины U : $\{u_i\}$, $i = 1, 2, \dots, s$. Оценка плотности распределения одномерной случайной величины U может быть представлена следующим выражением:

$$p_s(u) = \frac{1}{sC_s} \sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u - u_i}{C_s}\right), \quad (2.3)$$

где $\Phi(\cdot)$ - чётная неотрицательная функция ядерного типа, а C_s - параметр, который определяет степень размытости ядерной функции (рисунок 2.4).

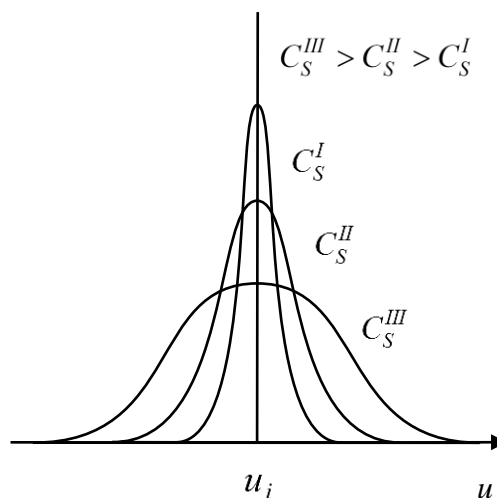


Рисунок 2.4. Влияние параметра C_s на степень размытия ядерной функции

Оценка (2.3) является асимптотически несмещённой и состоятельной [263], [76] в случае выполнения условий, наложенных на параметр C_s :

$$C_s > 0, \lim_{s \rightarrow \infty} sC_s = \infty, \lim_{s \rightarrow \infty} C_s = 0. \quad (2.4)$$

При этом ядерная функция удовлетворяет следующим условиям:

$$\frac{1}{C_s} \int_{\Omega(u)} \Phi\left(\frac{u}{C_s}\right) du = 1, \lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{C_s} \int_{\Omega(u)} \varphi(u - \mu) \Phi\left(\frac{u}{C_s}\right) dt \right) = \varphi(\mu), \quad (2.5)$$

что в частности влечёт в асимптотике приближение ядерной функции к дельта-функции Дирака:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{C_s} \Phi\left(\frac{u}{C_s}\right) = \delta(u). \quad (2.6)$$

В качестве ядерных функций предлагаются многочисленные варианты, из которых особо выделим следующие:

– функция Гаусса:
$$\frac{1}{C_s} \Phi\left(\frac{u}{C_s}\right) = \frac{1}{C_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-u^2}{2C_s^2}\right), \quad (2.7)$$

– функция Соболева:
$$\frac{1}{C_s} \Phi\left(\frac{u}{C_s}\right) = \begin{cases} \frac{0.8286}{C_s} \exp\left(\frac{u^2}{u^2 - C_s^2}\right), & |u| \leq C_s, \\ 0, & |u| > C_s, \end{cases} \quad (2.8)$$

– кусочно-постоянное ядро:
$$\frac{1}{C_s} \Phi\left(\frac{u}{C_s}\right) = \begin{cases} \frac{1}{2C_s}, & |u| \leq C_s, \\ 0, & |u| > C_s, \end{cases} \quad (2.9)$$

– усечённая парабола (функция Епанечникова [64]):

$$\frac{1}{C_s} \Phi\left(\frac{u}{C_s}\right) = \begin{cases} \frac{3}{4C_s} \left(1 - \frac{u^2}{C_s^2}\right), & |u| \leq C_s, \\ 0, & |u| > C_s. \end{cases} \quad (2.10)$$

Для многомерной случайной величины также предложена оценка плотности распределения вероятности. Пусть случайная величина U имеет размерность k : $u = u_1, u_2, \dots, u_k$. Дана выборка измерений

$\{u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ki}\}$, $i = 1, 2, \dots, s$. Оценкой плотности будет следующая статистика [75], [76]:

$$\begin{aligned} p_s(u) &= \frac{1}{s(C_s)^k} \sum_{i=1}^s \left[\Phi\left(\frac{u_1 - u_{1i}}{C_s}\right) \cdot \Phi\left(\frac{u_2 - u_{2i}}{C_s}\right) \cdot \dots \cdot \Phi\left(\frac{u_k - u_{ki}}{C_s}\right) \right] = \\ &= \frac{1}{s(C_s)^k} \sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{C_s}\right). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Параметры C_s могут быть различными для разных компонентов многомерной случайной величины. Пусть C_s – вектор размерности k : $C_s = (C_1, C_2, \dots, C_k)$, тогда оценка плотности примет вид:

$$p_s^*(u) = \frac{1}{s \prod_{j=1}^k C_j} \sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{C_j}\right). \quad (2.12)$$

Оценка плотности вероятности входит в выражения для вычисления всевозможных характеристик случайных величин. В частности, условной плотности вероятности [13], [73], [175] и так далее. Нас же интересует применение непараметрических оценок в задачах регрессионного анализа, т. е. при восстановлении функциональной зависимости этих величин друг от друга.

Пусть X и U – некоторые случайные величины. По определению, *регрессией* называется условное математическое ожидание [96], [63]:

$$\hat{x}(u) = M\{x/u\} = \frac{\int x p(x, u) dx}{\int_{\Omega(x, u)} p(x, u) dx} = \frac{\int_{\Omega(x, u)} x p(x, u) dx}{p(u)}. \quad (2.13)$$

Приведем непараметрическую оценку регрессии для одномерного случая. Пусть имеется выборка статистически независимых наблюдений случайных величин U и X : $\{u_i, x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Заменяя плотности распределения

вероятностей, входящие в выражение (2.13), их непараметрическими оценками

$$p_n(u) = \frac{1}{nC_s} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right), \quad p_n(x,u) = \frac{1}{n(C_n)^2} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x_i}{C_n}\right) \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right), \quad (2.14)$$

получаем

$$\begin{aligned} x_n(u) &= \frac{\int_{\Omega(x,u)} x \frac{1}{n(C_n)^2} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x-x_i}{C_n}\right) \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right) dx}{\frac{1}{nC_n} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right)} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right) \left[\int_{\Omega(x)} x \frac{1}{C_n} \Phi\left(\frac{x-x_i}{C_n}\right) dx \right]}{\sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right)}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой x_i в силу свойств ядерных функций (2.5), (2.6). Окончательно, непараметрическая оценка регрессии имеет следующий вид [147]:

$$x_n(u, C_n) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right)}{\sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{u-u_i}{C_n}\right)}. \quad (2.16)$$

Проиллюстрируем поведение оценки (2.16). Пусть объект описывается уравнением $x(u) = 10 \sin(u/10)$, $u \in [-10; 60]$. Для случайных выборок измерений объемом $n = 201$ и $n = 51$ построим непараметрическую модель, приняв параметр размытости $C_n = 2.2$ (рисунки 2.5, 2.6).

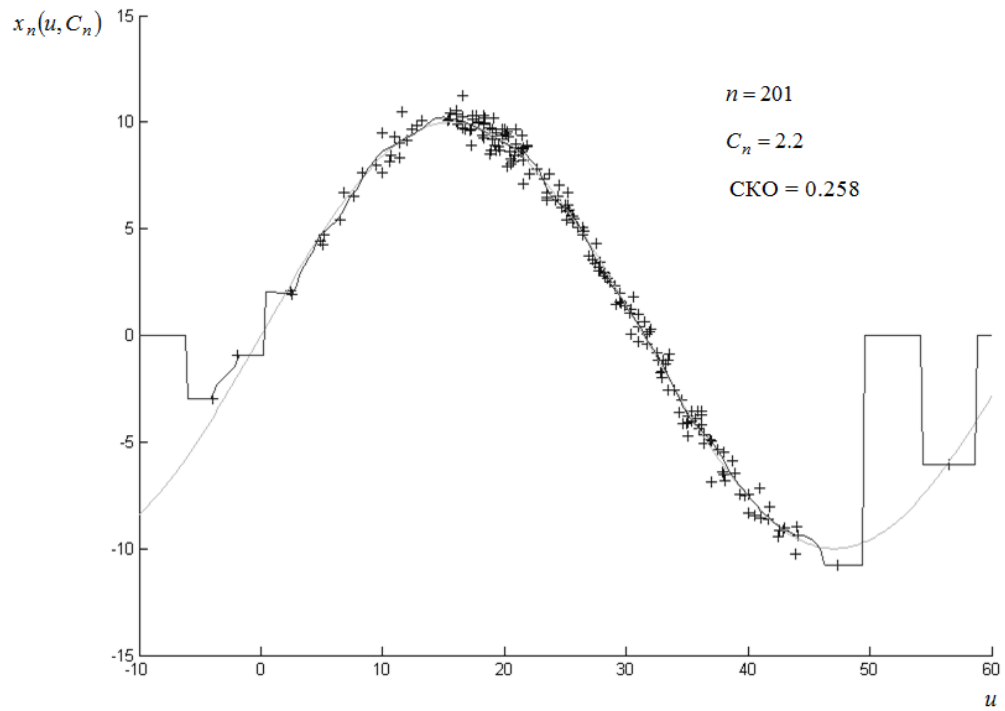


Рисунок 2.5. Кривая непараметрической оценки регрессии с параметрами:

$$n = 201, C_n = 2.2, \text{SKO} = 0.258$$

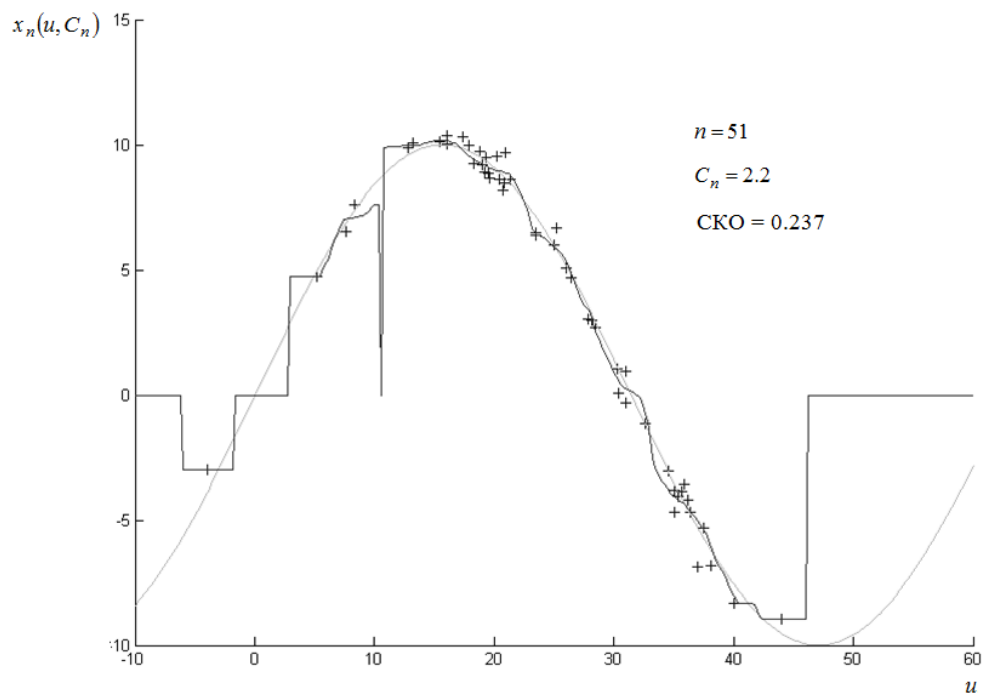


Рисунок 2.6. Кривая непараметрической оценки регрессии с параметрами:

$$n = 51, C_n = 2.2, \text{SKO} = 0.237$$

На рисунках 2.5 и 2.6 специальными маркерами отмечены выборочные значения, а сплошной линией – непараметрические оценки регрессии. Для расчетов были приняты выборки, различные по величине при одинаковых значениях параметра размытости. Нетрудно увидеть изменение качества оценивания с изменением объема выборки, а также поведение оценки в областях с различной плотностью выборочных значений.

Для иллюстрации влияния C_n на результат отобразим оценку при следующих параметрах $n = 51$, $C_n = 10.2$ (рисунок 2.7).

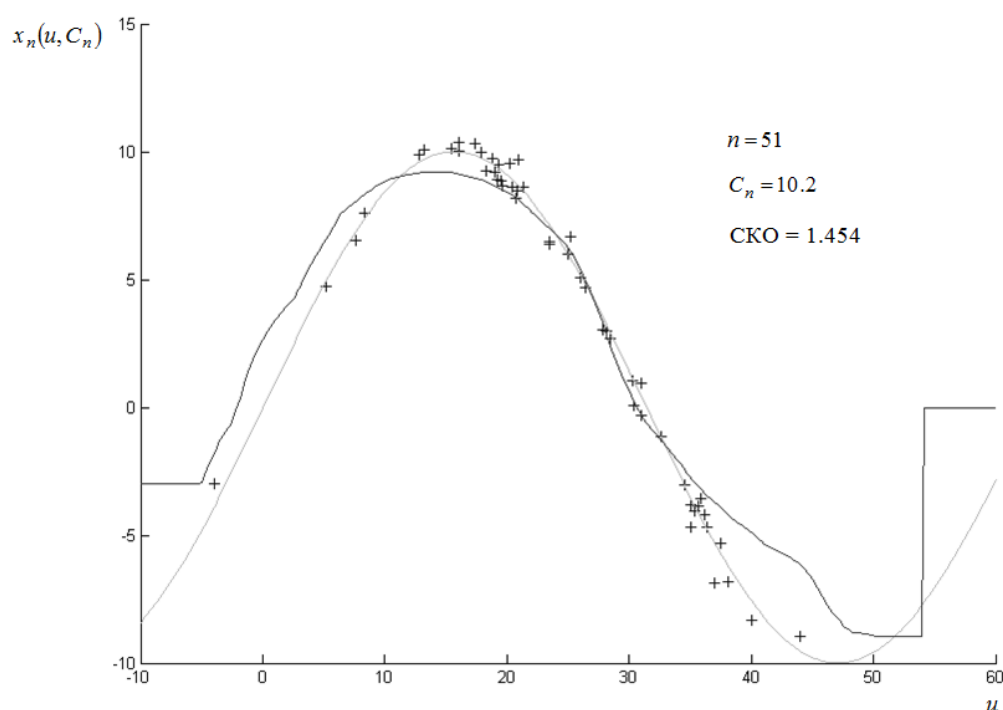


Рисунок 2.7. Кривая непараметрической оценки регрессии с параметрами:

$$n = 51, C_n = 10.2, \text{СКО} = 1.454$$

Рисунок 2.7 иллюстрирует тот факт, что для больших C_n наблюдается деформация модели, особенно в областях, где плотность размещения элементов выборки невысока.

Непараметрические оценки регрессии не требуют знания структуры уравнения и опираются лишь на выборочные значения входной и выходной величин объекта. Однако для качественного оценивания зависимостей с их помощью нужен сравнительно большой объем выборки.

Вывод оценки регрессии для случая многомерной случайной величины U , проводится аналогично выводу оценки для скалярного случая. Пусть выборка «вход-выход» объекта представлена в виде $\{u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ki}, x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Оценка регрессии примет следующий вид [76], [92], [190]:

$$x_n(u_1, u_2, \dots, u_k) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{C_j}\right)}{\prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{C_j}\right)}. \quad (2.17)$$

Оценки регрессии вида (2.16) и (2.17) могут использоваться при построении моделей статических объектов. При этом величина U представляет собой входное воздействие объекта, а X – выходную величину (отклик на входное воздействие).

Параметр C_n оценки регрессии (2.16) естественно выбирать оптимальным в соответствии с критерием среднего квадрата ошибки оценивания с применением так называемого «скользящего экзамена» [209]. Принцип «скользящего экзамена» заключается в последовательном исключении из рассмотрения элемента выборки при вычислении соответствующего ему квадрата невязки в критериальной функции:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{n-1}(u_i, C_n) - x_i)^2 \rightarrow \min_{C_n}, \quad (2.18)$$

$$\text{где } x_{n-1}(u_i, C_n) = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n x_j \Phi\left(\frac{u_i - u_j}{C_n}\right) \bigg/ \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \Phi\left(\frac{u_i - u_j}{C_n}\right).$$

Процесс оптимизации с использованием сформированного критерия (2.18) не будет приводить к ошибочно малым значениям оптимального параметра, когда из-за малости охвата ядра оценка и выборочное значение совпадают.

Применение оценок типа (2.17) с участием автора осуществлялось при решении различных практических задач, например, в ходе построения моделей технологических процессов нефтепереработки в условиях неопределенности

[31].

Во многих случаях при работе с моделями, входные переменные принимают дискретные значения в узлах равномерных сеток. То есть, компоненты выборочных значений входной величины U подчиняются следующей закономерности: $u_{i+1} = u_i + \Delta u$, $i = 1, 2, \dots, s$.

При работе с большими выборками также бывает удобно вместо исходной выборки работать со вторичной, сохраняющей по большей части информативность первой, но при этом гораздо более «компактной». Кроме этого новая «равномерная выборка» обладает свойствами, позволяющими упростить процедуру вычисления оценок регрессии.

Для перехода к новой выборке введем равномерную сетку в пространстве входной переменной. Новая выборка объемом $s \ll n$ генерируется путем вычислений по формуле непараметрической оценки регрессии (2.16) в узлах сетки. «Густота» вводимой сетки (или её шаг Δu) на практике может быть различной. Однако следует обратить внимание на то, что величина шага определяет объем новой выборки, а значит, и её информативность при построении модели объекта.

Вследствие введения новой выборки в узлах сетки знаменатель в выражении (2.16) становится величиной, приближённо равной константе, так как представляет собой непараметрическую оценку равномерной плотности распределения с точностью до параметра:

$$p(u, C_s) = \frac{1}{C_s} \sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u - u_i}{C_s}\right) \approx const. \quad (2.19)$$

Этот эффект был проверен в результате численного эксперимента для выборок различного объема и различных типов ядерных функций [127]. На рисунке 2.8 приведены результаты численных экспериментов с целью подтверждения соотношения (2.19). В ходе численного эксперимента была сгенерирована выборка объемом $s = 21$ в области $u \in [-10; 10]$ в узлах сетки с единичным шагом. Параметр размытости был принят $C_s = 2$.

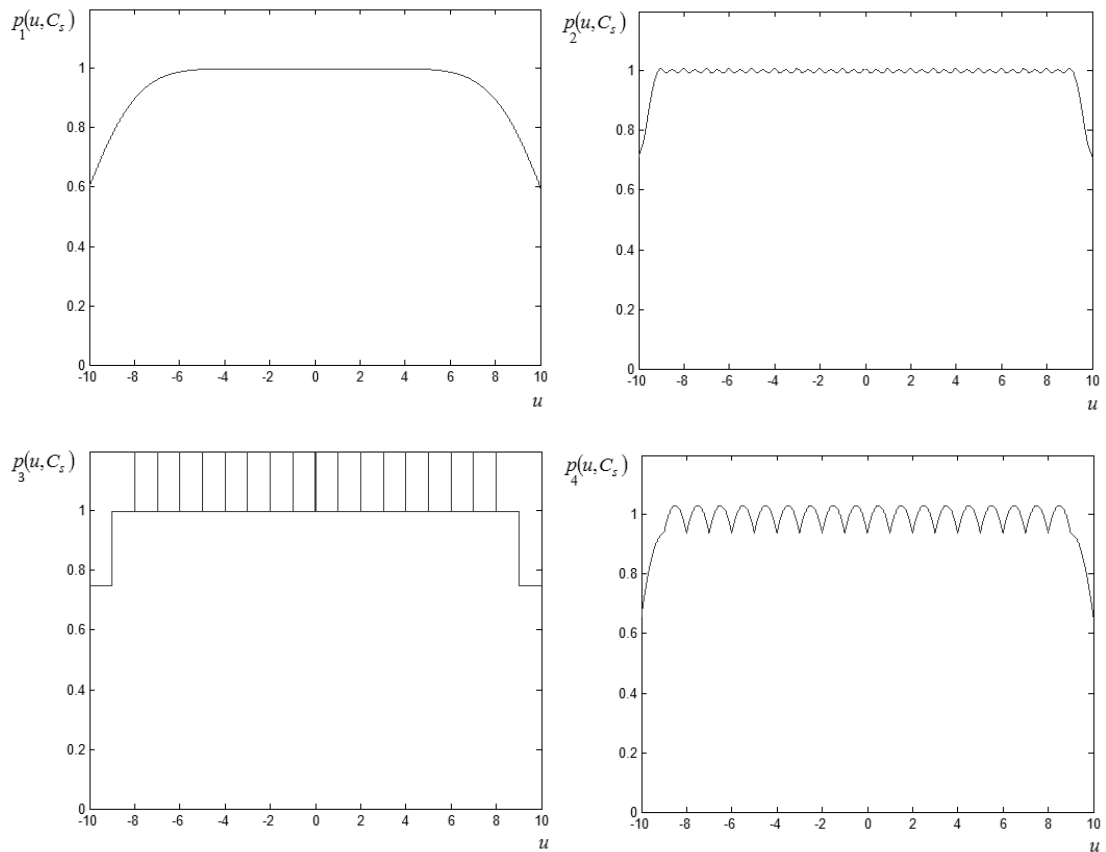


Рисунок 2.8. Экспериментальная проверка соотношения (2.19) с использованием ядер (2.7) – (2.10)

На рисунке 2.8 нетрудно заметить, что $p_k(u) \approx 1$, $k = 1, \dots, 4$. Приближённое равенство объясняется тем, что для экспериментов использовалась ограниченная выборка. Тем не менее, можно считать, что в задачах непараметрического оценивания в случае больших выборок степень приближения (2.19) достаточна для получения удовлетворительных результатов оценивания. Необходимо также обратить внимание на искажения оценки в областях, соответствующих границам выборки. Это вызвано свойством локальности непараметрических оценок.

После перехода к равномерной выборке $\{u_i, x_i\}$, $u_{i+1} = u_i + \Delta u$, $i = 1, 2, \dots, s$ получаем класс непараметрических оценок, названных *H-аппроксимациями* [19], [130]:

$$x_s(u, C_s) = \frac{K}{sC_s} \sum_{i=1}^s x_i H\left(\frac{u - u_i}{C_s}\right), \quad (2.20)$$

где $H(\cdot)$ - ядерная функция, C_s - параметр размытости для новой выборки объема s , K - константа, длина интервала, на котором определена равномерная выборка, т.е. $K = u_s - u_1$ для упорядоченной в порядке возрастания выборки. С учетом последнего равенства перепишем (2.20):

$$x_s(u, C_s) = \frac{\Delta u}{C_s} \sum_{i=1}^s x_i H\left(\frac{u - u_i}{C_s}\right). \quad (2.21)$$

Численные эксперименты с H -аппроксимациями включали построение серии моделей, иллюстрирующих их качественные и количественные свойства при различных объемах выборки и значениях параметра размытости. Так на рисунке 2.9 представлены модели функциональной зависимости $x(u) = u^2 + u$. Выборка объемом $s = 50$ генерировалась на интервале $u \in [0; 10]$ с добавлением случайной нормально распределённой помехи с параметрами: $\mu = 0$, $\sigma = 5$. В качестве ядра в оценке использовали функцию Соболева (2.8).

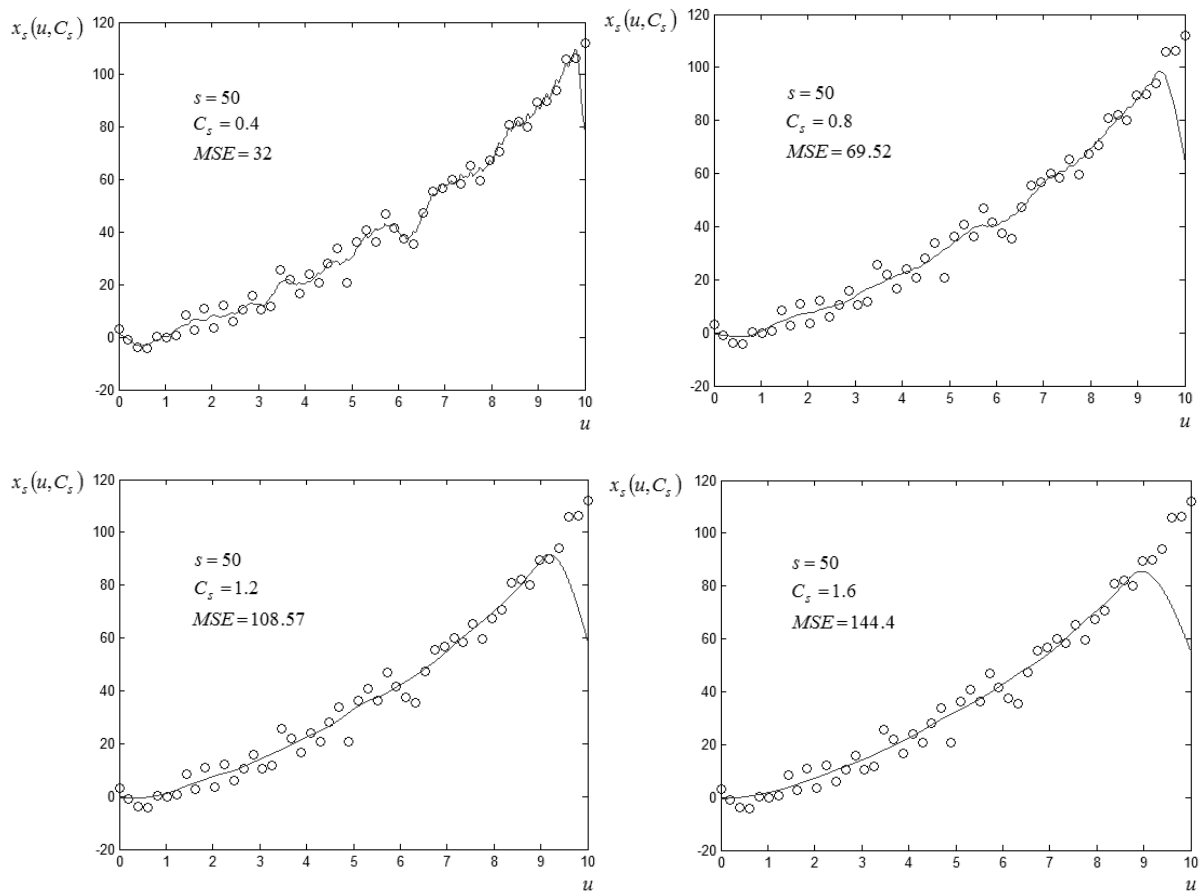


Рисунок 2.9. Иллюстрации численного моделирования оценки (2.21) с различными значениями параметра размытости

На рисунке MSE обозначает средний квадрат отклонений выборочных значений переменной x от прогнозных значений, рассчитанных с помощью модели (2.21):

$$MSE = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_s(u_i, C_s) - x_i)^2. \quad (2.22)$$

Необходимо отметить, что этот показатель отражает качество построенной модели, так как служит мерой близости выборочных и прогнозных значений.

Для оптимизации модели (2.21) невозможно использовать критерий «скользящего экзамена», так как исключение одного элемента выборки нарушает предположение о её равномерном распределении в этой локальной области. Для нахождения оптимального параметра размытости предлагается использовать дополнительные тестовые выборки $\{u_i^*, x_i^*\}$, $u_i^* = u_i + \Delta u$, $i = 1, 2, \dots, s$, элементы которых располагаются также в узлах сетки. Следовательно, оптимизацию оценки регрессии в виде H -аппроксимации возможно осуществлять при помощи следующего критерия:

$$W(C_s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_s(u_i, C_s) - x_i^*)^2 \rightarrow \min_{C_s}. \quad (2.23)$$

То есть, оценивание производим по обучающей выборке, а сравнение результатов оценивания осуществляем с элементами тестовой выборки (заданной также в узлах сетки).

На рисунке 2.10 представлены кусочно-линейные приближения критериальных функций (2.23) для выборок объемом $s=50$ и $s=100$, построенные по результатам численных экспериментов.

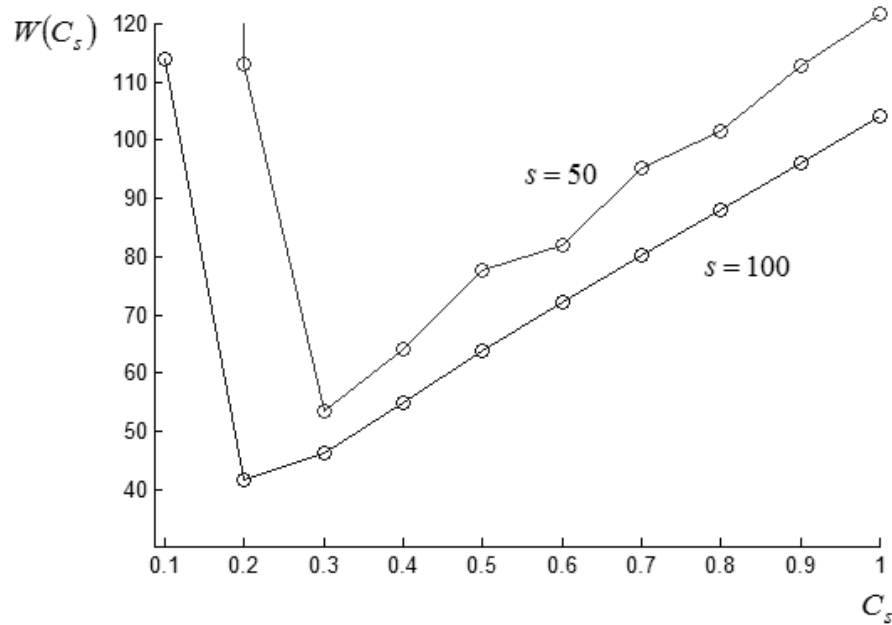


Рисунок 2.10. Результаты сравнительного анализа критериальных функций (2.23) для выборок различного объема

Численный анализ критериальных функций (2.23) показывает следующие закономерности:

- с ростом объема выборки растет также и точность прогноза, получаемого при помощи модели;
- критериальная функция (2.23) имеет точку минимума, соответствующую оптимальному параметру C_s для определённого набора рабочих и тестовых выборочных данных;
- увеличение объема выборки приводит к уменьшению величины оптимального параметра C_s .

Таким образом, общепринятые подходы к построению критериев оптимизации («скользящий экзамен» и некоторые другие) неприменимы в случае оптимизации оценки регрессии в виде H -аппроксимации. В обязательном порядке требуется наличие нескольких выборок (минимум двух), которые необходимо использовать в качестве рабочих и тестовых при настройке модели.

2.3. Методы и алгоритмы идентификации линейных динамических объектов

В предыдущем параграфе шла речь об оценивании статистических характеристик и моделировании зависимостей, инвариантных относительно времени. Такие модели обычно называют *моделями статических объектов* или *моделями объектов без памяти* [164], [219]. В дальнейшем остановимся на задаче построения моделей *динамических объектов*, обладающих свойствами *линейности* и *стационарности*.

Рассмотрим систему со скалярным входным сигналом $u(t)$ и скалярным выходным сигналом $x(t)$ (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11. Схематическое представление линейной динамической системы

Говорят, что система *стационарна*, если форма её реакции на произвольный входной сигнал не зависит от выбора начала отсчета времени. Система *линейна*, если её выходная реакция на линейную комбинацию входных сигналов совпадает с линейной комбинацией выходных реакций на каждый отдельный входной сигнал. Систему называют *причинно обусловленной (динамической)*, если значение выходного сигнала в произвольный момент времени зависит от значений входного сигнала в более ранние моменты времени до текущего момента включительно [120].

Стационарные линейные системы представляют собой наиболее важный класс динамических систем, рассматриваемых в теории и на практике. Как правило, такие системы соответствуют идеализированному представлению о реально протекающих процессах. Но, несмотря на это, такое приближение оправдано, а проектные решения, основанные на использовании линейной теории, во многих случаях приводят к хорошим результатам [120].

Известно, что линейная стационарная причинно обусловленная система может быть описана импульсной переходной функцией (импульсной реакцией, весовой функцией) $g(t)$. Суть импульсной переходной функции (ИПФ) заключается в том, что она представляет собой реакцию системы при нулевых начальных условиях на входное воздействие, совпадающее с дельта-функцией Дирака [54], [187]. ИПФ полностью описывает динамические свойства линейной системы. С передаточной функцией системы $\Phi(p)$ ИПФ связана через обратное преобразование Лапласа [54]:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \Phi(p) e^{pt} dp. \quad (2.24)$$

Любые другие передаточные и частотные характеристики линейной системы связаны соотношениями с импульсной переходной функцией. ИПФ входит в следующее интегральное представление модели линейной динамической системы [120], [168], [186]:

$$x(t) = h(0)u(t) + \int_0^t g(\tau)u(t-\tau)d\tau, \quad (2.25)$$

где $h(t)$ - переходная функция системы.

Модель линейной динамической системы в виде (2.25) называют *интегралом Дюамеля*. Существуют также и другие формы записи интеграла Дюамеля, тождественные виду (2.25):

$$x(t) = h(0)u(t) + \int_0^t g(t-\tau)u(\tau)d\tau, \quad (2.26)$$

$$x(t) = h(t)u'(0) + \int_0^t h(\tau)u'(t-\tau)d\tau, \quad (2.27)$$

$$x(t) = h(t)u'(0) + \int_0^t h(t-\tau)u'(\tau)d\tau. \quad (2.28)$$

Обладая сведениями о переходной функции системы $h(t)$, импульсной переходной функции $g(t)$, а также о входном воздействии $u(t)$, $0 \leq t \leq T$, (где T – длительность переходного процесса, время до момента, когда выход объекта

принимает установившееся значение, или *время регулирования объекта*), можно произвести последовательный расчет выходного процесса $x(t)$. При этом реакция системы на импульсное воздействие является исчерпывающей информацией для построения модели системы.

Импульсная переходная функция системы, как известно из теории линейных систем, обладает важным свойством. Она совпадает с первой производной от переходной функции системы $h(t)$. В свою очередь $h(t)$ - это реакция системы на единичное ступенчатое воздействие. Следовательно, обладая информацией о переходной функции, можно определить точно либо оценить импульсную переходную функцию $g(t)$.

В теории непараметрических систем предложен способ оценивания производной зависимости выходной переменной X объекта от входной U [72], [73], [81]. Пусть ядерная функция $H(\cdot)$ является дифференцируемой. Тогда оценкой первой производной регрессионной зависимости $x = x(u)$ будет непараметрическая оценка следующего вида:

$$x'_s(u, C_s) = \frac{\Delta u}{C_s^{II}} \sum_{i=1}^s x_i H' \left(\frac{u - u_i}{C_s^{II}} \right), \quad (2.29)$$

где $H'(\cdot)$ - первая производная по u функции $H(\cdot)$, C_s^{II} - параметр размытости для оценки производной.

В задачах оценивания производной в качестве ядерной функции $H(\cdot)$ принимаем функцию Соболева (2.8). Выбор функции Соболева обусловлен набором свойств, которыми она обладает:

- функция Соболева дифференцируема на всей области определения;
- функция $H(\cdot)$ и её первая производная $H'(\cdot)$ принимают ненулевые значения в ограниченной области $|u - u_i| \leq C_s = C_s^{II}$;
- на границах данной области функция и её производная равны нулю;
- функция Соболева удовлетворяет свойствам (2.5) - (2.6).

Функция Соболева и её первая производная изображены на рисунке 2.12.

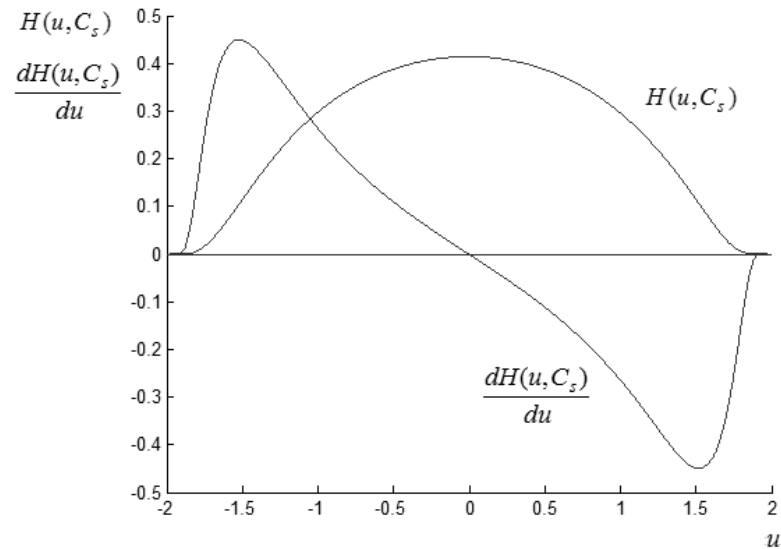


Рисунок 2.12. Функция Соболева и её первая производная при $C_s = C_s^{II} = 2$

Оценка (2.29) содержит производную функции Соболева, математическое выражение которой имеет достаточно сложный вид и неудобно для применения в вычислительной процедуре. Данную проблему можно решить заменой функции Соболева и её производной кусочно-постоянными или другими кусочными аналогами [19], [131] (рисунок 2.13).

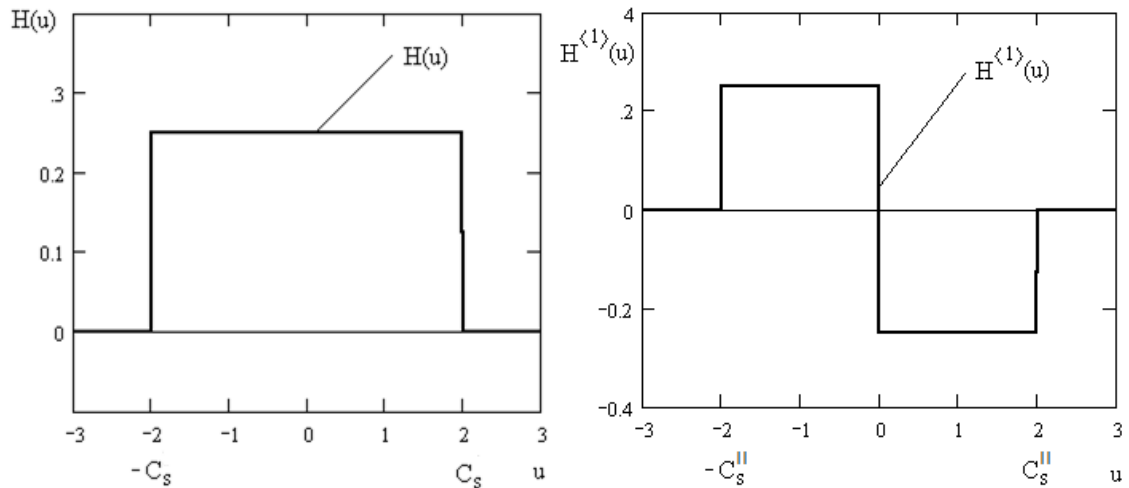


Рисунок 2.13. Кусочно-постоянная ядерная функция $H(\cdot)$ (а)

и кусочно-постоянный аналог первой производной функции Соболева $H^{(1)}(\cdot)$

(б) для случая $u_i = 0$, $C_s = C_s^{II} = 2$

Использование кусочных аппроксимаций позволяет на практике существенно упростить вычислительные процедуры, при этом сохраняются асимптотические свойства оценки (2.29).

Для использования в вычислительных процедурах предлагается использовать кусочно-постоянные аналоги функций $H(\cdot)$ и $H^{(1)}(\cdot)$ следующего вида:

$$\frac{1}{C_s} H\left(\frac{u-u_i}{C_s}\right) = \begin{cases} 1/2C_s & |u-u_i| \leq C_s, \\ 0 & |u-u_i| \geq C_s. \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{C_s^{II}} H^{(1)}\left(\frac{u-u_i}{C_s^{II}}\right) = \begin{cases} 1/(C_s^{II})^2 & -C_s^{II} \leq u-u_i \leq 0, \\ -1/(C_s^{II})^2 & 0 \leq u-u_i \leq C_s^{II}, \\ 0 & |u-u_i| > C_s^{II}. \end{cases} \quad (2.31)$$

Условия сходимости оценок производных сводится к следующим соотношениям [19]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} H(u) du = 1, \quad \int_{-\infty}^{\infty} H'(u) du = 0, \quad C_s^{II} \int_{-\infty}^{\infty} H'(u) u du = 0, \quad (2.32)$$

что будет показано в дальнейшем.

Уже было упомянуто, что оценки первой производной функции регрессии будут также оценками импульсной переходной функции линейной динамической системы. Пусть имеется случайная выборка $\{t_i, h_i\}, i=1,2,\dots,s$ реализации переходной функции, полученная в результате эксперимента над динамической системой. Выборочные значения измерены через равный интервал времени Δt , такой что $t_{i+1} = t_i + \Delta t$, причем $T = t_s - t_1$ в терминах теории автоматического управления будем считать *временем регулирования*. Тогда непараметрическая оценка импульсной переходной функции линейной динамической системы принимает вид [11], [81], [132]:

$$g_s(t, C_s^{II}) = \frac{T}{sC_s^{II}} \sum_{i=1}^s h_i H'\left(\frac{t-t_i}{C_s^{II}}\right), \quad (2.33)$$

а соотношение для непараметрической модели линейной динамической системы:

$$x_s(t, u(t), C_s, C_s^H) = h_s(0, C_s)u(t) + \int_0^t g_s(\tau, C_s^H)u(t-\tau)d\tau, \quad (2.34)$$

где $h_s(t, C_s)$ - непараметрическая оценка переходной функции в классе H -аппроксимаций [19], [132], [134]:

$$h_s(t, C_s) = \frac{T}{sC_s} \sum_{i=1}^s h_i H\left(\frac{t-t_i}{C_s}\right). \quad (2.35)$$

Первое слагаемое в модели (2.34) можно опустить, следовательно, непараметрическую модель линейной динамической системы запишем следующим образом:

$$x_s(t, u(t), C_s^H) = \int_0^t g_s(\tau, C_s^H)u(t-\tau)d\tau. \quad (2.36)$$

Численному исследованию моделей вида (2.36) посвящены работы с непосредственным участием автора диссертации, в том числе [11], [14], [36], [231], [226].

Необходимо отметить, что представленная модель описывает динамические процессы с одним входом и одним выходом. Свойство линейности позволяет распространить технологию построения моделей и для варианта систем с векторным входом. Этому посвящены работы [17], [163] и др.

Непараметрическое моделирование линейных динамических систем включает в себя задачу оптимизации модели по параметру C_s^H . В частности, для этого предлагается использовать критерий, минимизирующий средний квадрат погрешности реализаций переходной функции, измеренной на объекте, и её непараметрической модели [131]:

$$J = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left[x_s(t_i, 1(t), C_s^H) - h_i \right]^2 \rightarrow \min_{C_s^H}. \quad (2.37)$$

Здесь $x_s(\cdot)$ обозначает реакцию модели (2.36) на единичное входное воздействие.

На рисунках 2.14 - 2.15 [36] приведены критериальные функции J ,

полученные в результате экспериментов над моделями для выборок различных объемов.

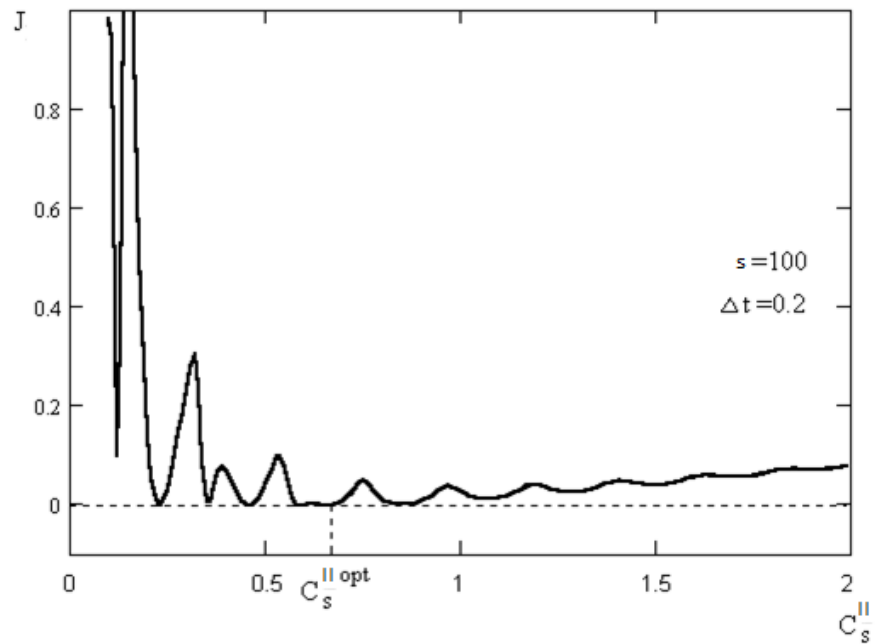


Рисунок 2.14. График критериальной функции (2.37) для выборки $s = 100$

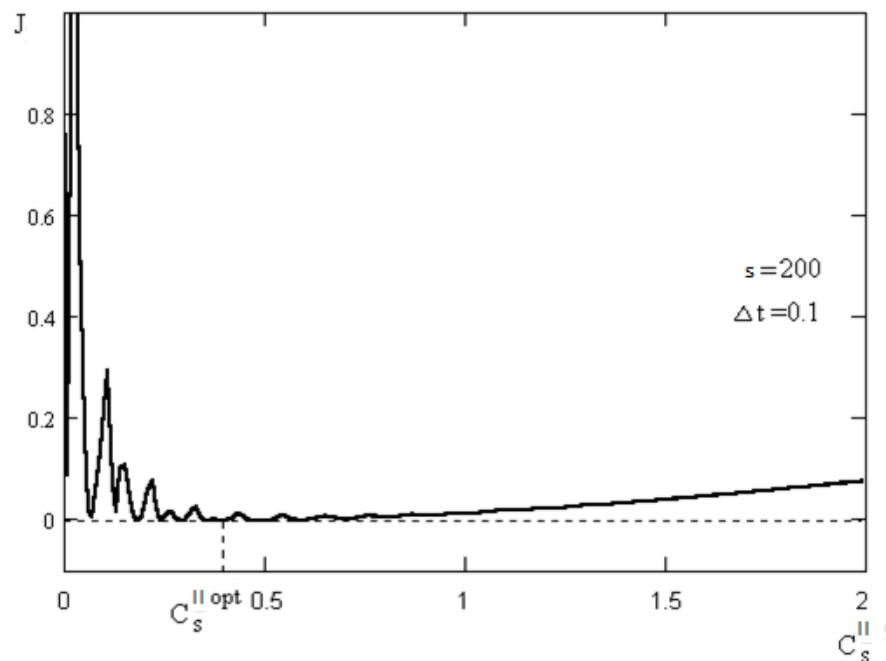


Рисунок 2.15. График критериальной функции (2.37) для выборки $s = 200$

На рисунке 2.16 [36] представлено взаимное расположение полученных в результате численных экспериментов значений минимума критерия (2.37). Точками на плоскости изображены значения параметра размытости и критериальной функции при различных величинах объема выборки без помех и

со случайной аддитивной помехой, составляющей 5% от абсолютной величины выхода объекта.

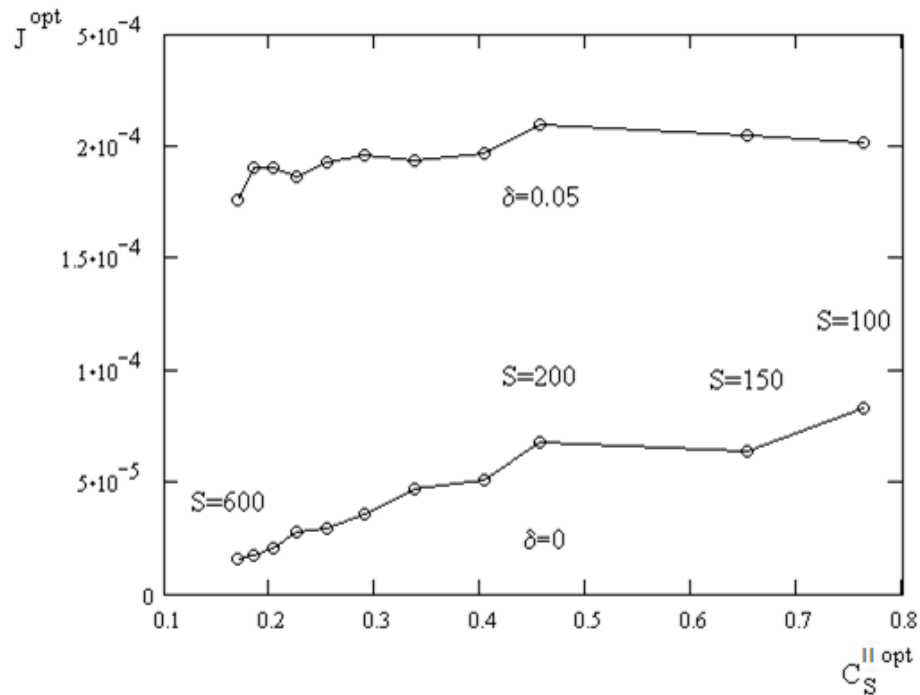


Рисунок 2.16. Взаимное расположение точек минимума критериальной функции (2.37) при различных объемах выборки с помехами и без помех

Анализируя изображённый график, можно сделать выводы о характере асимптотического поведения непараметрической модели линейной динамической системы. С ростом объема выборки средний квадрат отклонения выхода модели от выборочных значений выхода объекта уменьшается, оптимальное значение параметра C_s^{II} становится меньше. Рост уровня помех приводит к ухудшению качества модели.

Важной проблемой является выбор алгоритма оптимизации оценок. Природа критериальной функции (2.37) такова, что при относительно малых значениях параметра C_s^{II} наблюдается неустойчивость, «зашумленность» критерия. Причину такого поведения критериальной функции можно объяснить во-первых её случайным характером, а во-вторых тем, что при малых C_s^{II} непараметрические оценки приближаются к набору дельта-функций и не отражают реальную форму модели. Таким образом, в процессе оптимизации крайне нежелательно попасть в эту область неустойчивости значений

критериальной функции. Поэтому выбор оптимального C_s^{II} осуществлялся заведомо в области минимума, имеющего наибольшую зону «притяжения». Такая тактика оптимизации в условиях стохастического критерия позволяет получить устойчивую к влияниям случайных помех оценку.

Эксперименты показали, что функция (2.37) имеет точки минимума, которые расположены с определённой закономерностью. Так для случая, когда отсутствовала случайная помеха при использовании колоколообразной функции Соболева в алгоритме оценивания, расположение точек минимума зависело от величины шага выборки следующим образом:

$C_s^{IIopt} \in \{1.66\Delta t, 2.25\Delta t, 2.85\Delta t, 3.4\Delta t, 3.9\Delta t, 4.6\Delta t, 5.1\Delta t, 5.6\Delta t, 7.8\Delta t, 8.9\Delta t\dots\}$, где Δt - величина шага равномерной выборки. Было предложено использовать найденные значения C_s^{II} в качестве стартовых в процессе оптимизации, или выбирать ограничения с учетом этой информации.

Было отмечено [14], что с ростом C_s^{II} критериальная функция (2.37) становится более гладкой. Поэтому целесообразно использовать такие методы оптимизации, которые проводят спуск к точке минимума из начальной точки, лежащей заведомо в области больших значений параметра оптимизации. Описанная стратегия была осуществлена с использованием метода квадратичной интерполяции [51], модифицированного с учетом особенностей решаемой задачи.

Приведем описание алгоритма оптимизации. Хорошо известный метод квадратичной интерполяции основан на процедуре аппроксимации критериальной функции на каждом шаге с применением квадратичной функции. Пусть имеются значения критериальной функции в трех произвольных точках: $(\alpha, J_\alpha), (\beta, J_\beta), (\gamma, J_\gamma)$. Аппроксимация заключается в расчете коэффициентов A, B и C квадратичной функции. Значения этих коэффициентов определяем из следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} A\alpha^2 + B\alpha + C = J_\alpha \\ A\beta^2 + B\beta + C = J_\beta \\ A\gamma^2 + B\gamma + C = J_\gamma \end{cases} \quad (2.38)$$

Найденные значения коэффициентов подставляют в уравнение квадратной функции $F(x) = Ax^2 + Bx + C$ и отыскивают точку её экстремума. Положение этой точки задается следующей зависимостью [51]:

$$x^* = -\frac{B}{2A} = \frac{1}{2} \frac{(\beta^2 - \gamma^2)J_\alpha + (\gamma^2 - \alpha^2)J_\beta + (\alpha^2 - \beta^2)J_\gamma}{(\beta - \gamma)J_\alpha + (\gamma - \alpha)J_\beta + (\alpha - \beta)J_\gamma}. \quad (2.39)$$

В полученной точке вычисляют значение критериальной функции. Сравнивают имеющиеся четыре точки по значениям функции в них и отбрасывают точку с наихудшим значением. Повторяют процедуру до тех пор, пока не выполнится критерий остановки:

$$\left| J(x_i^*) - J(x_{i-1}^*) \right| < \varepsilon. \quad (2.40)$$

Сходимость классического метода квадратичной интерполяции доказана для унимодальных функций. Критериальная функция в задаче непараметрического моделирования линейной динамической системы не является унимодальной. Более того, минимум критериальной функции, интересующий исследователя, не является глобальным. Однако, относительная гладкость критериальной функции в области больших значений C_s позволяет предположить, что метод квадратичной интерполяции с некоторыми модификациями будет приводить к устойчивым результатам.

Были предложены следующие идеи для модификации алгоритма:

- 1) Запуск алгоритма производить из начальной точки в области заведомо больших C_s^{II} ($\alpha = (20 \div 30)\Delta t$), где Δt - величина шага выборки;
- 2) Одну из трех точек зафиксировать в области малых C_s^{II} ($\beta = (1 \div 2)\Delta t$) и искусственно присвоить ей заведомо большое значение;
- 3) Изменять значение в фиксированной точке в процессе оптимизации

по следующему правилу:

$$J_{\beta} = \text{const} \cdot \max \{J_{\alpha}, J_{\beta}, J_{\gamma}\}, \quad 2 \leq \text{const} \leq 8. \quad (2.41)$$

Перемещать фиксированную точку в сторону увеличения C_s^{II} в случае, если расположение точек позволяет судить о перекрытии точки минимума.

Алгоритм квадратичной интерполяции, модифицированный, в соответствии с предложенным алгоритмом, обладает следующими достоинствами:

- обеспечивает переменную длину шага оптимизации в зависимости от наклона кривой критерия как градиентный метод, но не требует доступность производных или их оценок,

- не требует задания левой границы оптимизации,

- на практике обладает хорошей скоростью сходимости.

Для сравнения был взят алгоритм метода золотого сечения [142]. Как простейший поисковый метод, метод золотого сечения позволяет за относительно малое число шагов отыскать точку минимума (алгоритм сходится за постоянное число шагов на фиксированном интервале), но требует задания левой границы оптимизации и не учитывает некоторых особенностей критериальной функции. Он не требует предварительной настройки и прост в работе. Метод квадратичной интерполяции имеет лучшее математическое обоснование, но требует более тщательной настройки. Таким образом, оба метода обладают как преимуществами, так и недостатками. Наиболее рациональным подходом является включение обоих методов в состав программного модуля, и предоставление возможности пользователю в диалоговом режиме выбрать тот или иной метод.

Одним из задач, поставленных в работе, является создание алгоритмического и программно-технического обеспечения, осуществляющего непараметрическое моделирование линейных динамических систем. Выделим следующие этапы работы алгоритма построения моделей ЛДС.

1. Выбор объекта моделирования. Вопросы, связанные с выделением

объекта, рассматривались, например, в [167], [168].

2. Проведение эксперимента по определению реакции динамического объекта на единичное воздействие. Предполагается, что в силу принципа суперпозиции возможна декомпозиция динамического объекта, имеющего несколько входных переменных.

- выбор шага Δt измерения реакции объекта на единичное воздействие;
- выбор единицы измерения входного сигнала (величины единичной «ступеньки» в терминах реального объекта),
- собственно проведение эксперимента со снятием выборки «ВХОД-ВЫХОД»,
- оценка времени затухания переходного процесса (времени регулирования).

3. Формирование критерия настройки параметров модели и проведение процесса оптимизации полученных критериев.

4. Расчет модели ЛДС при оптимальных параметрах.

Более подробно приведем содержание перечисленных этапов. Выбор объекта обычно состоит в процессе выделения объекта из среды, который полностью определяется целями, стоящими перед исследователем [167], [168]. В настоящей работе основная цель заключалась в обеспечении отладки алгоритма построения моделей. Поэтому наиболее рационально было задать объект моделирования в виде абстрактного математического описания.

В качестве объекта моделирования было взято линейное разностное уравнение 3-го порядка:

$$\begin{aligned}
 x_i &= \alpha u_i + \beta x_{i-1} + \chi x_{i-2} + \delta x_{i-3} = \\
 &= \frac{K}{A+B+C+D} u_i + \frac{3A+2B+C}{A+B+C+D} x_{i-1} - \\
 &- \frac{3A+B}{A+B+C+D} x_{i-2} + \frac{A}{A+B+C+D} x_{i-3} - \frac{E}{A+B+C+D}, \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

где $u_i, x_i, i=1,2,\dots$ - дискретные значения входной и выходной переменных объекта. Коэффициенты в уравнении выбирались из условия устойчивости и

принимали следующие значения: $K = 6.24$, $A = \frac{0.15}{\Delta t^3}$, $B = \frac{1.965}{\Delta t^2}$, $C = \frac{2.7}{\Delta t}$, $D = 6.24$, $E = 0$; Δt выбирался исходя из удобства отображения результатов. Время регулирования найдено экспериментально, начальные условия приняты нулевыми.

С использованием разностной модели (2.42) получена рабочая выборка $\{t_i, h_i\}$, $i = 1, 2, \dots, s$. Она представляет собой реакцию «объекта» на единичное входное воздействие, измеренную через равный интервал времени в области, ограниченной началом переходного процесса и временем регулирования, т.е. в предыдущих обозначениях $x_i = h_i, u_i = 1(t_i)$. Построение модели линейной динамической системы проводилось при помощи следующей процедуры:

$$\hat{x}(t_j) = \sum_{k=0}^{t_j/\Delta\tau} \left[\Delta t \sum_{i=1}^s h_i \cdot H' \left(\frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s^{IIopt}} \right) \right] u(t_j - k\Delta\tau) \Delta\tau, \quad (2.43)$$

где $u(t_j)$ - произвольное входное воздействие, также заданное в дискретные моменты времени t_j , $j = 1, 2, \dots, s, s+1, \dots$; $\Delta\tau$ - величина шага численного интегрирования, C_s^{IIopt} - оптимальный параметр размытости. Вычислительная форма критерия оптимизации модели по параметру размытости приняла следующий вид:

$$\hat{J} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left[\sum_{k=0}^{t_i/\Delta\tau} g_s(k\Delta\tau, C_s^{II}) \Delta\tau - h_i \right]^2 \rightarrow \min_{C_s^{II}}, \quad (2.44)$$

где $g_s(t, C_s^{II})$ - вычислительная форма непараметрической оценки импульсной переходной функции [19]:

$$g_s(t, C_s^{II}) = \Delta t \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{t - t_i}{C_s^{II}} \right). \quad (2.45)$$

Данные о скорости сходимости модифицированного алгоритма квадратичной аппроксимации, который применялся для оптимизации критерия (2.44), приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Анализ скорости выполнения процесса оптимизации с использованием критериальной функции (2.44)

Объем выборки	Начальное значение	Величина константы	Количество шагов
$s = 50$	$C_0 = 5$	2	11
$s = 50$	$C_0 = 10$	2	24
$s = 50$	$C_0 = 5$	3	18
$s = 50$	$C_0 = 10$	3	30
$s = 70$	$C_0 = 5$	3	8
$s = 70$	$C_0 = 10$	3	14

Для сравнения, метод золотого сечения при решении этой же задачи при одинаковых условиях на интервале $[0; 5]$ сходится за 17 шагов [36].

Результаты моделирования критерия оптимизации были приведены ранее. На их основе можно сделать выводы о характере асимптотического поведения моделей:

- модели, полученные в результате идентификации объекта с помехами измерения исходной выборки, хуже описывают реальный объект;
- при больших объемах исходной выборки оптимальные значения параметра размытости уменьшаются;
- объем выборки определяет качество идентификации: чем большая информация об объекте доступна, тем точнее модель.

Для экспериментирования с непараметрическими моделями взяты следующие функции в качестве задающих сигналов:

1. Ступенчатая функция:

$$u_1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 2, & 0 \leq t < 10, \\ 0, & 10 \leq t < 20, \\ -1, & 20 \leq t < 30, \\ 1, & 30 \leq t. \end{cases} \quad (2.46)$$

2. Кусочная непрерывная функция:

$$u_2(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \sin(\pi \cdot t / 20), & 0 \leq t < 10, \\ 2 - 0.1 \cdot t, & 10 \leq t < 20, \\ (0.1414 \cdot (t - 20))^2, & 20 \leq t < 30, \\ 0, & 30 \leq t. \end{cases} \quad (2.47)$$

На рисунках 2.17 – 2.19 представлены иллюстрации экспериментов по численному моделированию ЛДС [226].

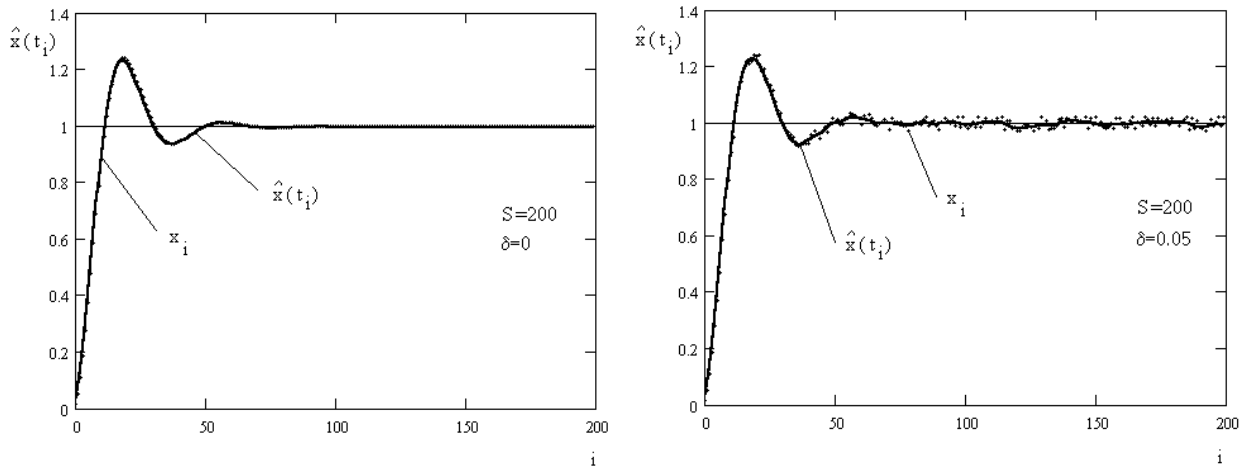


Рисунок 2.17. Непараметрическая оценка переходной функции ЛДС, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% от величины выхода объекта(б)

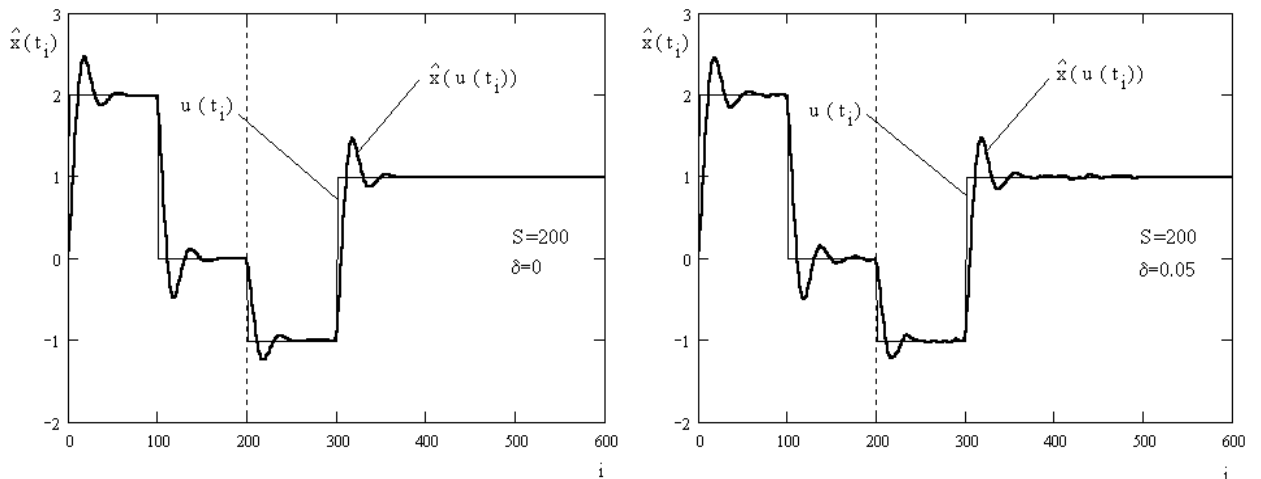


Рисунок 2.18. Реакция непараметрической модели ЛДС на ступенчатый тестовый сигнал, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% величины выхода (б)

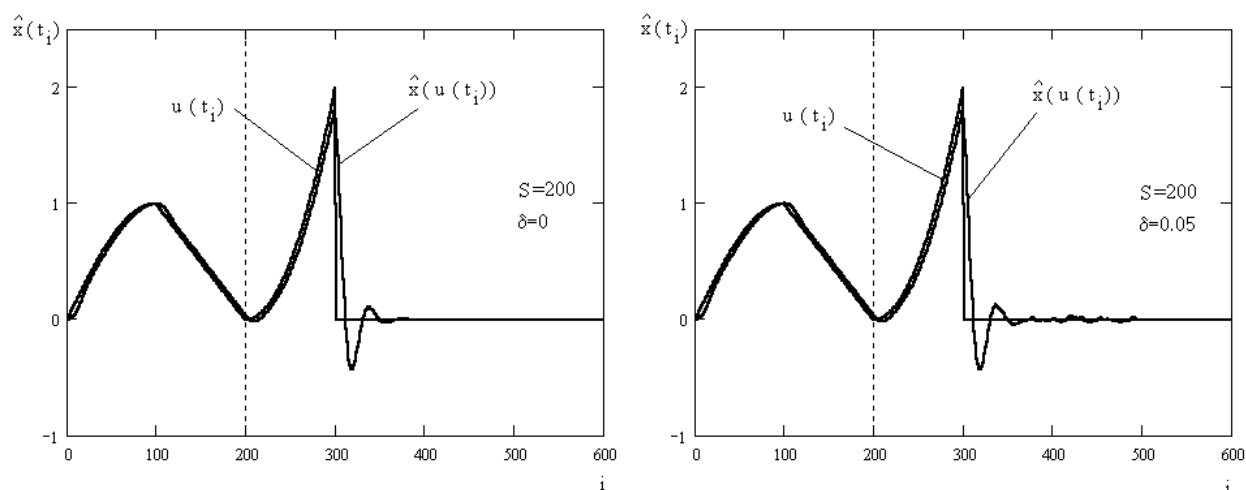


Рисунок 2.19. Реакция непараметрической модели ЛДС на сложное воздействие, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% величины выхода (б)

Эксперименты показали высокую точность прогнозных моделей ЛДС с применением непараметрического метода идентификации.

Проведение исследований непараметрической модели динамики включало в себя серию опытов с целью проверки работоспособности алгоритмов для данного класса оценок в случае, когда исходный объект содержал элемент запаздывания. Известно, что абсолютное большинство реальных объектов идентификации - это объекты с запаздыванием, поэтому результаты такого эксперимента имеют важное значение для изучения практической применимости непараметрических моделей ЛДС. Линейную динамическую систему с запаздыванием описывают уравнением [187]:

$$x(t) = Au(t - \tau_0), \quad (2.48)$$

где A - оператор линейной динамической системы, $u(t)$ - входной сигнал, $x(t)$ - сигнал на выходе ЛДС, τ_0 - постоянная запаздывания.

Соотношение (2.48) показывает, что входной сигнал воспроизводится на выходе запаздывающего звена без искажений, но с временным запаздыванием τ_0 (рисунок 2.20).

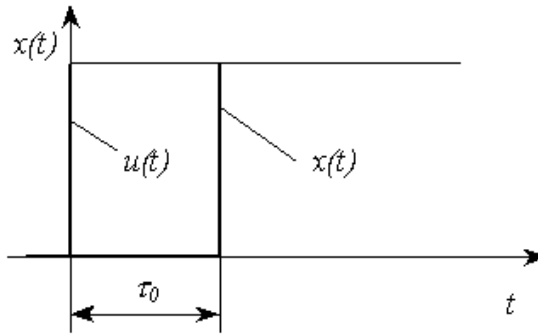


Рисунок 2.20. Принцип функционирования запаздывающего звена, на входе системы ступенчатое воздействие

В ходе численных экспериментов в уравнение в разностной форме (2.42), представляющее собой «объект» идентификации, было введено запаздывание. Величины постоянной запаздывания дискретного объекта составили 50 и 150 дискретных интервалов, равных величине шага выборки Δt . Проведен ряд экспериментов с целью проверки работоспособности непараметрических моделей линейной динамики для идентификации объектов с запаздыванием [83]. Эксперименты подтвердили возможность моделирования ЛДС с запаздыванием при помощи непараметрических моделей без внесения каких-либо изменений в базовый алгоритм.

На рисунках 2.21–2.23 [36] представлены иллюстрации экспериментов по моделированию ЛДС с запаздыванием.

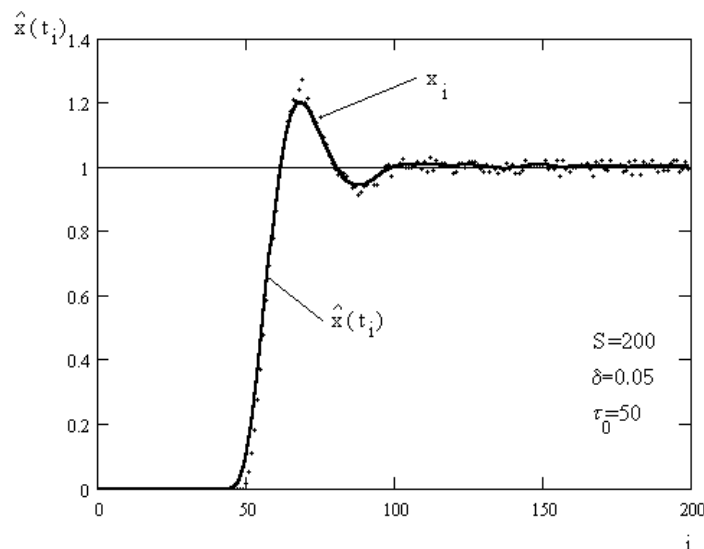


Рисунок 2.21. Непараметрическая модель переходной функции ЛДС с запаздыванием

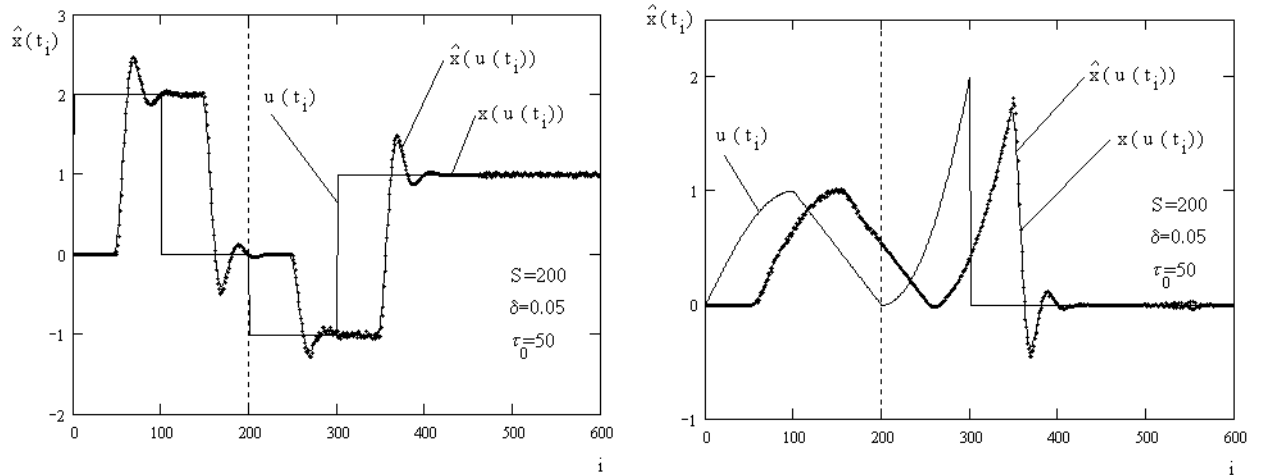


Рисунок 2.22. Иллюстрации экспериментов по моделированию ЛДС с запаздыванием $\tau_0=50$, случайная помеха 5% от величины выхода

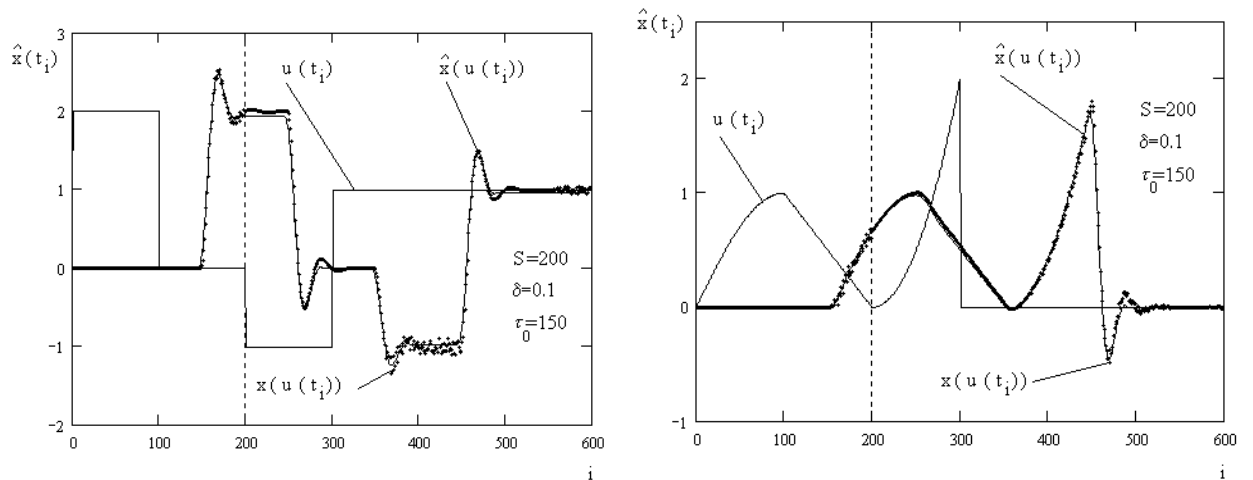


Рисунок 2.23. Иллюстрации экспериментов по моделированию ЛДС с запаздыванием $\tau_0=150$, случайная помеха 10% от величины выходной переменной

Очевидно, что точность моделирования динамических процессов возрастает с увеличением объема выборки. При этом величина запаздывания не оказывает существенного влияния на точность идентификации.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что методы и алгоритмы идентификации линейных динамических систем с запаздыванием являются работоспособными и могут быть применены для решения практических задач моделирования линейных систем в целях прогноза протекания динамических процессов с запаздыванием, а также создания систем

автоматического регулирования такими процессами.

2.4. Сходимость непараметрических моделей

Непараметрическая оценка производной кривой регрессии имеет вид:

$$x'_s(t) = \frac{T}{sC_s} \sum_{i=1}^s x_i H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right), \quad (2.49)$$

где T - константа, длина интервала, на котором определена равномерная выборка $\{t_i, x_i\}, i=1, 2, \dots, s$, т.е. $T = t_s - t_1$, обозначение параметра C_s равносильно C_s^H в выражении (2.33).

Теорема 1. Оценка вида (2.49) является асимптотически несмещённой и сходится в среднеквадратическом при следующих условиях [36]:

$$\int_{\Omega(v)} H'(v) dv = 0, \quad C_s \int_{\Omega(v)} H'(v) v dv = 1, \quad \text{где } v = \frac{t-\tau}{C_s}, \quad (2.50)$$

при несмещённости и некоррелированности элементов обучающей выборки $\{x_i\}, i=1, 2, \dots, s$, а также условиях (2.4), наложенных на параметр C_s .

Доказательство

$$M \{x'_s(t)\} = \frac{T}{sC_s} \sum_{i=1}^s M \{x/t = t_i\} H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right).$$

Принимая во внимание, что величина шага выборки $\Delta t = \frac{T}{s}$ в пределе при $s \rightarrow \infty$ стремится к нулю, по определению определенного интеграла [51] получаем следующее тождество:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \{x'_s(t)\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{C_s} \int_{\Omega(\tau)} \hat{x}(\tau) H' \left(\frac{t-\tau}{C_s} \right) d\tau, \quad \text{где } \hat{x}(t) = M \{x/t\}.$$

Введем замену: $\frac{t-\tau}{C_s} = v, \quad \tau = t - C_s v, \quad d\tau = -C_s dv$.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \{x'_s(t)\} = - \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{C_s} \int_{\Omega(v)} \hat{x}(t - C_s v) H'(v) C_s dv = - \lim_{s \rightarrow \infty} \int_{\Omega(v)} \hat{x}(t - C_s v) H'(v) dv$$

Разложим функцию $\hat{x}(t - C_s v)$ в ряд Тейлора в точке t .

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \{x'_s(t)\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} \int_{\Omega(v)} H'(v) \left(-\hat{x}(t) + C_s v \hat{x}'(t) - \frac{C_s^2}{2!} v^2 \hat{x}''(t) + \dots \right) dv = \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} \left(-\hat{x}(t) \int_{\Omega(v)} H'(v) dv + C_s \hat{x}'(t) \int_{\Omega(v)} H'(v) v dv - \frac{C_s^2}{2!} \hat{x}''(t) \int_{\Omega(v)} H'(v) v^2 dv + \dots \right). \end{aligned}$$

Слагаемое ряда Тейлора, содержащее вторую производную $\hat{x}''(t)$, также как и последующие, стремятся к нулю в силу свойства $\lim_{s \rightarrow \infty} C_s = 0$. Первое слагаемое равно нулю по условиям Теоремы. Коэффициент при $\hat{x}'(t)$ равен единице. Таким образом, оценка производной является несмещённой, т.е.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \{x'_s(t)\} = \hat{x}'(t) = \frac{dM\{x/t\}}{dt}.$$

Покажем, что среднеквадратическое отклонение оценки производной (2.49) стремится к нулю при $s \rightarrow \infty$.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t) - \hat{x}'(t))^2 \right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} - (\hat{x}'(t))^2.$$

Покажем, что $\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} = (\hat{x}'(t))^2$.

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \frac{T^2}{(sC_s)^2} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s x_i x_j H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right) H' \left(\frac{t-t_j}{C_s} \right) \right\} = \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \frac{T^2}{(sC_s)^2} \sum_{i=1}^s \left(x_i H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right) \right)^2 + \frac{T^2}{(sC_s)^2} \sum_{i=1}^s \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^s x_i x_j H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right) H' \left(\frac{t-t_j}{C_s} \right) \right\} = \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ \frac{T^2}{(sC_s)^2} \sum_{i=1}^s M \left\{ x^2 / t = t_i \right\} \left(H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right) \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T^2}{(sC_s)^2} \sum_{i=1}^s \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^s M \left\{ x(t) x(t_1) / t = t_i, t_1 = t_j \right\} H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right) H' \left(\frac{t-t_j}{C_s} \right) \right\}. \end{aligned}$$

Переходя в пределе к определённым интегралам, имеем:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ \frac{T}{sC_s^2} \int_{\Omega(\tau)} M \{ x^2/t = \tau \} \left(H' \left(\frac{t-\tau}{C_s} \right) \right)^2 d\tau + \right. \\ \left. + \frac{s-1}{sC_s^2} \iint_{\Omega(\tau, \tau_1)} M \{ x(t)x(t_1)/t = \tau, t_1 = \tau_1 \} H' \left(\frac{t-\tau}{C_s} \right) H' \left(\frac{t-\tau_1}{C_s} \right) d\tau d\tau_1 \right\},$$

где $M \{ x(t)x(t_1)/t = \tau, t_1 = \tau_1 \} = M \{ x/t = \tau \} \cdot M \{ x/t = \tau_1 \} + K \{ x(\tau)x(\tau_1) \}$.

В свою очередь, корреляционная функция

$$K \{ x(\tau)x(\tau_1) \} = M \{ (x(\tau) - M \{ x(\tau) \})(x(\tau_1) - M \{ x(\tau_1) \}) \} = M \{ x(\tau) - M \{ x(\tau) \} \} \times \\ \times M \{ x(\tau_1) - M \{ x(\tau_1) \} \} + K \{ x(\tau) - M \{ x(\tau) \}, x(\tau_1) - M \{ x(\tau_1) \} \}.$$

Величины $x(\tau) - M \{ x(\tau) \}$ и $x(\tau_1) - M \{ x(\tau_1) \}$ представляют собой случайные помехи, наложенные на истинную характеристику $\hat{x}(t) = M \{ x(t) \} = M \{ x/t \}$ в моменты времени τ и τ_1 . В силу несмещённости помехи: $M \{ x(\tau) - M \{ x(\tau) \} \} = M \{ x(\tau_1) - M \{ x(\tau_1) \} \} = 0$, некоррелированность помехи влечет: $K \{ x(\tau) - M \{ x(\tau) \}, x(\tau_1) - M \{ x(\tau_1) \} \} = 0$. Следовательно, верно тождество:

$$M \{ x(t)x(t_1)/t = \tau, t_1 = \tau_1 \} = M \{ x/t = \tau \} \cdot M \{ x/t = \tau_1 \},$$

и справедливо равенство:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ \frac{T}{sC_s^2} \int_{\Omega(\tau)} M \{ x^2/t = \tau \} \left(H' \left(\frac{t-\tau}{C_s} \right) \right)^2 d\tau + \right. \\ \left. + \frac{s-1}{sC_s^2} \int_{\Omega(\tau)} M \{ x/t = \tau \} H' \left(\frac{t-\tau}{C_s} \right) d\tau \int_{\Omega(\tau_1)} M \{ x/t = \tau_1 \} H' \left(\frac{t-\tau_1}{C_s} \right) d\tau_1 \right\}.$$

Введем следующую замену: $\frac{t-\tau}{C_s} = v$, $\tau = t - C_s v$, $d\tau = -C_s dv$.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ -\frac{T}{sC_s} \int_{\Omega(v)} M \{ x^2/t = t - C_s v \} (H'(v))^2 dv + \right.$$

$$+ \frac{s-1}{s} \left(\int_{\Omega(v)} M \{x/ t = t - C_s v\} H'(v) dv \right)^2 \Bigg\}.$$

Первое слагаемое стремится к нулю, так как $sC_s = \infty$.

Вводя обозначение $\hat{x}(t) = M \{x/t\}$, получаем:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ \left(\int_{\Omega(v)} \hat{x}(t - C_s v) H'(v) dv \right)^2 - \frac{1}{s} \left(\int_{\Omega(v)} \hat{x}(t - C_s v) H'(v) dv \right)^2 \right\}.$$

Второе слагаемое стремится к нулю при $s \rightarrow \infty$.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^2 \right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left(\int_{\Omega(v)} \hat{x}(t - C_s v) H'(v) dv \right)^2 = (\hat{x}'(t))^2.$$

Таким образом, среднеквадратическое отклонение оценки производной стремится к нулю с ростом объема выборки. Теорема доказана.

Теорема 1.1. В условиях Теоремы 1 непараметрическая оценка производной, возведённая в степень $k > 1$, является асимптотически несмещённой, а именно [36]

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^k \right\} = (\hat{x}'(t))^k. \quad (2.51)$$

Доказательство

Доказательство данной теоремы представляет собой обобщение подхода, использованного в первой части Теоремы 1, на случай конечного целого $k, k > 1$.

$$\begin{aligned} M \left\{ (x'_s(t))^k \right\} &= M \left\{ \frac{T^k}{(sC_s)^k} \sum_{i_1=1}^s \dots \sum_{i_k=1}^s x_{i_1} \dots x_{i_k} H' \left(\frac{t-t_{i_1}}{C_s} \right) \dots H' \left(\frac{t-t_{i_k}}{C_s} \right) \right\} = \\ &= M \left\{ \frac{T^k}{(sC_s)^k} \sum_{i=1}^s \left(x_i H' \left(\frac{t-t_i}{C_s} \right) \right)^k + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T^k}{(sC_s)^k} \sum_{i_1=1}^s \dots \sum_{\substack{i_k=1 \\ i_k \neq i_1 \neq i_2 \dots}}^s x_{i_1} \dots x_{i_k} H' \left(\frac{t-t_{i_1}}{C_s} \right) \dots H' \left(\frac{t-t_{i_k}}{C_s} \right) \right\}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^k \right\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ \frac{T^{k-1}}{s^{k-1} C_s^k} \int_{\Omega(\tau)} M \left\{ x^k / t = \tau \right\} \left(H' \left(\frac{t - \tau}{C_s} \right) \right)^k d\tau + \right. \\ &+ \frac{(s-1) \dots (s-k+1)}{s^{k-1} C_s^k} \int \dots \int_{\Omega(\tau_1, \dots, \tau_k)} M \left\{ x(t_1) \dots x(t_k) / t_1 = \tau_1, \dots, t_k = \tau_k \right\} \times \\ &\left. \times H' \left(\frac{t - \tau_1}{C_s} \right) \dots H' \left(\frac{t - \tau_{k1}}{C_s} \right) d\tau_1 \dots d\tau_k \right\}. \end{aligned}$$

Введем замену: $\frac{t - \tau}{C_s} = v$, $\tau = t - C_s v$, $d\tau = -C_s dv$. С учетом

независимости выборки

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^k \right\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ -\frac{T^{k-1}}{s^{k-1} C_s^{k-1}} \int_{\Omega(v)} M \left\{ x^k / t = t - C_s v \right\} (H'(v))^k dv + \right. \\ &\left. + \frac{(s-1) \dots (s-k+1)}{s^{k-1}} (-1)^k \left(\int_{\Omega(v)} M \left\{ x / t = t - C_s v \right\} H'(v) dv \right)^k \right\}. \end{aligned}$$

Первое слагаемое стремится к нулю, так как $k > 1$, $s C_s = \infty$.

Второе слагаемое есть сумма $k+1$ членов, из которых все кроме первого стремятся к нулю при $s \rightarrow \infty$. Окончательно имеем

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x'_s(t))^k \right\} = (-1)^k \lim_{s \rightarrow \infty} \left(\int_{\Omega(v)} \hat{x}(t - C_s v) H'(v) dv \right)^k = (\hat{x}'(t))^k.$$

Теорема доказана.

Теорема 2. *Непараметрическая оценка выхода линейной динамической системы, имеющая вид*

$$x_s(t) = \int_0^t h'_s(\tau) u(t - \tau) d\tau, \quad (2.52)$$

при выполнении условий Теоремы 1, является асимптотически несмещённой и сходится в среднеквадратическом [36].

Доказательство

Докажем несмещённость оценки (2.52).

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \{x_s(t)\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \int_0^t h'_s(\tau) u(t-\tau) d\tau \right\} = \int_0^t \left[\lim_{s \rightarrow \infty} M \{h'_s(\tau)\} \right] u(t-\tau) d\tau = \\ &= \int_0^t \hat{h}'(\tau) u(t-\tau) d\tau = \hat{x}(t), \text{ где } \hat{h}'(t) = \frac{dM\{h/t\}}{dt}, \hat{x}(t) = M\{x/t\}. \end{aligned}$$

Покажем теперь, что оценка (2.52) сходится в среднеквадратическом.

Требуется доказать $\lim_{s \rightarrow \infty} M \{(x_s(t) - \hat{x}(t))^2\} = 0$.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \{(x_s(t) - \hat{x}(t))^2\} = \lim_{s \rightarrow \infty} M \{(x_s(t))^2\} - (\hat{x}(t))^2.$$

Покажем, что $\lim_{s \rightarrow \infty} M \{(x_s(t))^2\} = (\hat{x}(t))^2$.

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \{(x_s(t))^2\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \left(\int_0^t h'_s(\tau) u(t-\tau) d\tau \right)^2 \right\} = \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \int_0^t \int_0^{t_1} h'_s(\tau) h'_s(\tau_1) u(t-\tau) u(t_1-\tau_1) d\tau_1 d\tau \right\}, \\ \lim_{s \rightarrow \infty} M \{(x_s(t))^2\} &= \int_0^t \int_0^{t_1} \lim_{s \rightarrow \infty} M \{h'_s(\tau) h'_s(\tau_1)\} u(t-\tau) u(t_1-\tau_1) d\tau_1 d\tau, \\ \lim_{s \rightarrow \infty} M \{h'_s(\tau) h'_s(\tau_1)\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} [M \{h'_s(\tau)\} M \{h'_s(\tau_1)\} + K \{h'_s(\tau), h'_s(\tau_1)\}], \end{aligned}$$

где $K \{h'_s(\tau), h'_s(\tau_1)\}$ - корреляционная функция.

В силу неравенства Коши-Буняковского

$$|K \{h'_s(\tau), h'_s(\tau_1)\}| \leq \sqrt{M \{h'_s(\tau) - \hat{h}'(\tau)\}^2} \cdot \sqrt{M \{h'_s(\tau_1) - \hat{h}'(\tau_1)\}^2},$$

в силу Теоремы 1

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \{h'_s(\tau) - \hat{h}'(\tau)\}^2 = 0, \quad \lim_{s \rightarrow \infty} M \{h'_s(\tau_1) - \hat{h}'(\tau_1)\}^2 = 0.$$

Следовательно $\lim_{s \rightarrow \infty} K \{h'_s(\tau), h'_s(\tau_1)\} = 0$,

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \{h'_s(\tau) h'_s(\tau_1)\} = h'_s(\tau) h'_s(\tau_1).$$

Окончательно имеем

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ (x_s(t))^2 \right\} = \int_0^t \int_0^{t_1} \hat{h}'(\tau) \hat{h}'(\tau_1) u(t-\tau) u(t-\tau_1) d\tau_1 d\tau = (\hat{x}(t))^2.$$

Теорема доказана.

2.5. Прогноз выбега насосных агрегатов

В качестве примера динамической системы, функционирующей в условиях неопределенности, рассмотрим магистральный насосный агрегат. Как объект управления насосный агрегат характеризуется высокой сложностью математического описания. Среди факторов, влияющих на работу насосного агрегата, можно выделить следующие: дифференциальный напор, объемный (или массовый) расход нефти, температура корпуса, момент инерции системы «ротор-нефть», угловая скорость вращения ротора. Некоторые из перечисленных характеристик (момент инерции, мгновенный расход) неизвестны или не доступны к измерению, другие (угловая скорость, дифференциальный напор) измеряются косвенно или со случайными погрешностями. Дополнительно на работу насоса оказывает влияние контура регулирования с дросселирующей задвижкой.

Аварийное или плановое отключение насосного агрегата инициирует процесс его «выбега», т.е. остановки. Кроме выбега интерес представляет переход на другой установившийся режим работы вследствие изменений условий его функционирования. Предложено описывать переходный процесс для насоса с использованием динамической модели (2.43), основанной на данных измерений напора в ходе испытаний насосного агрегата. Ниже приведены данные измерений дифференциального напора центробежного насоса НМ10000-210 на Кемчугской НПС и отклик динамической модели напора с использованием соотношения (2.43) (рис. 2.24).

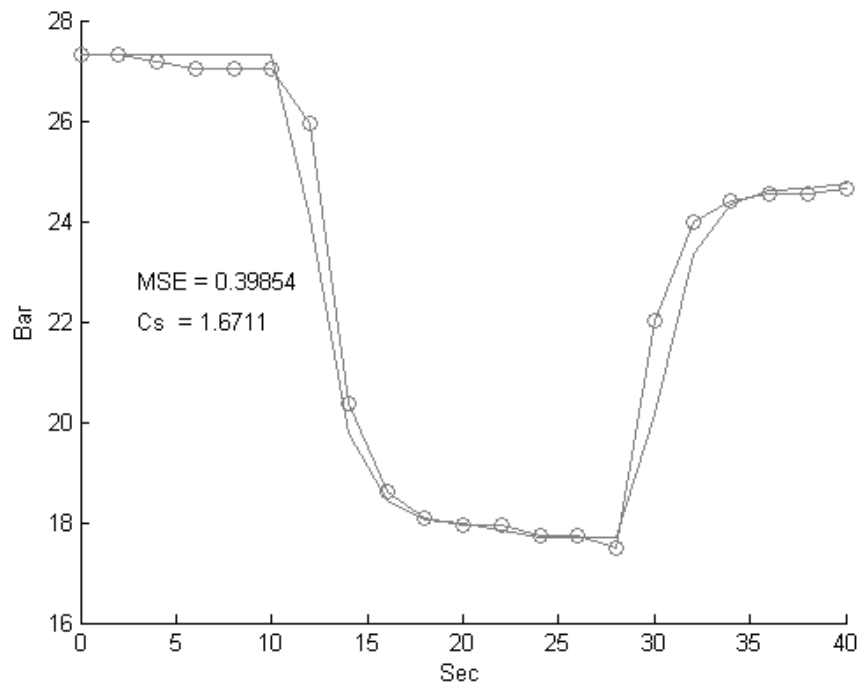
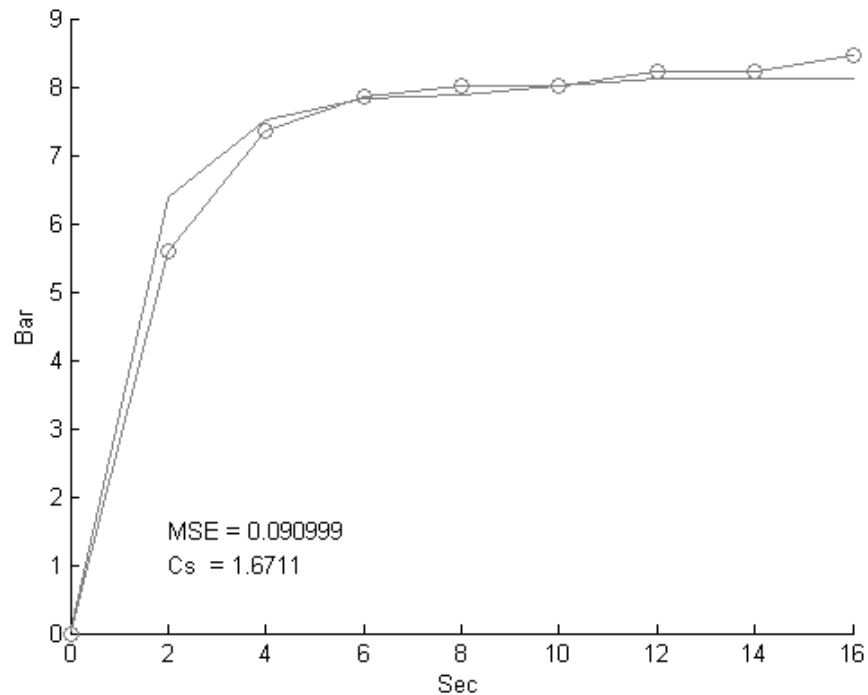


Рисунок 2.24. Результаты измерений дифференциального напора центробежного насоса и отклик динамической модели напора

Таким образом, опыт применения непараметрической модели линейной динамической системы к описанию процесса выбега насосного агрегата с центробежным насосом продемонстрировал высокую точность полученного результата в терминах среднеквадратической ошибки в условиях неполноты

информации об объекте.

Выводы по главе 2

Во второй главе диссертационной работы дано обоснование использования адаптивных методов идентификации для мониторинга и прогноза функционирования сложных технических объектов. В частности, представлены непараметрические модели как статических (безынерционных), так и динамических объектов, как один из вариантов моделирования систем в случае недостатка априорной информации.

Рассмотрены и исследованы непараметрические оценки регрессии, включая H -аппроксимации, а также оценка первой производной зависимости, заданной случайной выборкой. На основе оценки производной предложен класс алгоритмов непараметрического оценивания импульсной переходной функции линейной динамической системы. Используя представление линейных систем в виде интеграла Дюамеля, получен класс непараметрических моделей линейных динамических систем. Изучены вопросы оптимизации моделей по параметрам размытости. Сконструированы и реализованы алгоритмы моделирования линейных систем с запаздыванием, представлены результаты численных экспериментов с полученными методами и алгоритмами. Доказаны теоремы об асимптотической сходимости предложенных оценок производной и модели линейной динамической системы.

При использовании созданных алгоритмов для решения практических задач следует придерживаться следующих рекомендаций. В случае, когда объект моделирования описывается дифференциальным либо разностным уравнением невысокого порядка (четвертый, пятый) при уровне случайных помех до 10% от абсолютных величин выходного процесса для удовлетворительных результатов моделирования необходима равномерная выборка объемом 200-300 измерений в пределах интервала, соответствующего времени длительности переходного процесса объекта. Алгоритм не может быть

использован для идентификации существенно нелинейных объектов. Для объектов с чистым запаздыванием алгоритм идентификации может быть применен без каких-либо специальных доработок. Для нелинейных объектов целесообразно использовать другие подходы, например, применение непараметрических авторегрессионных моделей [228]. Перед началом процесса идентификации рекомендуется проводить линейное преобразование исходных выборочных данных таким образом, чтобы значения первых элементов выборки были близки к нулю. Это уменьшает влияние искажений непараметрической оценки в области, соответствующей левой границе выборки.

Проведённые исследования подтверждают эффективность разработанных методов, алгоритмического и программно-технического обеспечения для прогнозных моделей линейных систем в условиях непараметрической неопределённости. С учетом предложенных рекомендаций непараметрические алгоритмы идентификации линейных динамических процессов могут быть использованы решения для широкого круга практических задач, а именно для создания основы для дальнейших модификаций и вариантов алгоритмического и программно-технического обеспечения автоматизированных систем мониторинга и прогноза функционирования сложных технических систем.

На основе данных, полученных для процесса выбега насосного агрегата, с применением разработанных алгоритмов была построена его непараметрическая модель. Показано, что в условиях недостатка априорных сведений целесообразно применять аппарат непараметрических моделей для прогноза движения насосных агрегатов в неустановившихся режимах работы.

Глава 3. Линейность и линеаризация моделей динамических объектов

3.1 Относительная мера нелинейности динамических объектов

В теории идентификации объект или процесс представлен моделью, описывающей его в той или иной мере. В то же время, эта модель выбирается из определённого класса или множества, например из множества линейных моделей. Тогда говорят, что идентификация осуществляется в терминах линейной модели. Таким образом, в теории приходится иметь дело с двумя моделями: некоторой «истинной» моделью, описывающей идентифицируемый процесс, и моделью, в терминах которой осуществляется идентификация [189]. Эти модели по своей форме или классу могут совпадать, а могут и не совпадать. Последнее имеет, в частности, место в том случае, когда в интересах простоты алгоритма идентификации или простоты использования его результатов, модель, в терминах которой выполняется идентификация, выбирается более простой, чем модель идентифицируемого процесса [189].

Что касается линейности и стационарности динамических систем, то в пределах всех эксплуатационных областей этими свойствами практически обладают лишь очень немногие объекты. Абсолютно линейных динамических систем в реальном мире нет. Поэтому, говоря о применении теории идентификации линейных динамических систем, речь идет в основном об идентификации динамических объектов в окрестностях некоторых стационарных невозмущённых состояний [189].

Тем не менее, при решении практических задач необходима уверенность в том, что полученная модель объекта адекватно его описывает при данных условиях наблюдения и амплитудах входных воздействий. Возникает задача *проверки линейности* исследуемого объекта. Гипотеза о линейности проверяется на основе сформированных критериев линейности объекта, которые основаны на исследовании доступной информации об объекте [135].

Пусть $\{t_i, h_i\}, i=1,2,\dots,s$ - выборка измерений переходной функции системы (реакции объекта на единичное входное воздействие), $\{u(t_i), x_i\}$, $x_i = x(u(t_i))$, $i=1,2,\dots,s$ - случайная выборка - реакция объекта на некоторый тестовый сигнал $u(t)$. На основании этой информации предлагается сформировать критерии, позволяющие судить о принадлежности исследуемой системы к классу линейных.

Рассматриваемые критерии линейности можно разделить на две группы: одна основана на исследовании среднеквадратической ошибки модельного описания процесса в терминах линейных динамических систем, другая использует проверку корреляционной зависимости линейной динамической модели и усреднённых выборочных значений выходной характеристики, полученных экспериментально на объекте.

Основным свойством линейных систем является выполнение принципа суперпозиции, т.е. условий [159] и др.:

$$x(Ku(t)) = Kx(u(t)), \quad (3.1)$$

$$x(u_1(t) + u_2(t)) = x(u_1(t)) + x(u_2(t)), \quad (3.2)$$

где K - константа, $u_1(t), u_2(t)$ - некоторые входные воздействия, $x(u(t))$ - реакция объекта на соответствующее входное воздействие.

На основании соотношения (3.1) сформируем критерий, который представляет собой среднеквадратическое отклонение реакции модели на ступенчатое входное воздействие с амплитудой K от экспериментальной переходной функции системы, умноженной на коэффициент K :

$$W_I = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s [x_s(K \cdot 1(t_i)) - K \cdot h_i]^2 < \delta_I, \quad (3.3)$$

где δ_I - заданная константа, $x_s(\cdot)$ - реакция линейной непараметрической модели. Значение константы δ_I определяет порог точности критерия. В том случае, если система линейна и случайные погрешности измерений незначительны, величина критерия W_I будет близка к нулю. Аналогично из

соотношения (3.2) следует критерий:

$$W_{II} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s [x_s(u_1(t_i) + u_2(t_i)) - x_s(u_1(t_i)) - x_s(u_2(t_i))]^2 < \delta_{II}, \quad (3.4)$$

где δ_{II} - заданная константа, $x_s(\cdot)$ - реакция линейной непараметрической модели, $u_1(t_i)$ и $u_2(t_i)$ - некоторые входные воздействия, заданные в дискретные моменты времени t_i , $i = 1, 2, \dots, s$.

Принцип суперпозиции равносильен самому описанию системы в виде интеграла Дюамеля, что следует из процедуры его вывода [156] и др. Пользуясь этим утверждением, можно сформировать критерий принадлежности системы к классу линейных в виде следующего условия [29]:

$$W_{III} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s [x_s(u(t_i)) - x(u(t_i))]^2 < \delta_{III}, \quad (3.5)$$

где δ_{III} - заданная константа, $x(u(t_i))$ - реакция объекта на тестовый сигнал $u(t)$, в общем случае отличный от ступенчатого, $x_s(u(t_i))$ - реакция непараметрической модели в виде интеграла Дюамеля на такой же тестовый сигнал на входе.

Критерий (3.5) представляет собой среднеквадратическую ошибку модели динамической системы, когда процесс идентификации осуществляется при помощи непараметрических алгоритмов идентификации линейных систем. Предполагается, что эта ошибка будет значительно выше, когда описание объекта с использованием интеграла Дюамеля неадекватно решаемой задаче идентификации.

Критерий линейности (3.5) неустойчив к влиянию случайных помех, так как он напрямую использует выборочные значения, полученные в результате эксперимента над объектом и измеренные со случайными погрешностями. Для повышения помехоустойчивости предлагается вместо выборочных значений реакции объекта на тестовый сигнал использовать усреднённые. Для этих целей пригодны значения непараметрической регрессии, построенной на основе

полученной выборки с использованием, например, метода H -аппроксимаций. Критерий, использующий непараметрическое «сглаживание» приведен ниже [29].

$$W_{IV} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s [x_s(u(t_i)) - \hat{x}(u(t_i))]^2 < \delta_{IV}, \quad (3.6)$$

где δ_{IV} - константа, задающая требуемую точность, $\hat{x}(u(t_i))$ - значения оценки регрессии, полученные в результате использования H -аппроксимации, построенной на основе выборки измерений реакции динамической системы на тестовый сигнал.

Для представленных критериев линейности следует принять во внимание процесс измерения переходных характеристик объекта, предваряющий построение его модели. Во время проведения экспериментов над объектом необходимо подавать ступенчатые или иные воздействия на всем допустимом интервале входных величин. В противном случае мы будем обладать неполной информацией для проверки гипотезы о линейности изучаемого объекта в пределах всего интересующего нас диапазона входных воздействий.

Нелинейность динамической системы может быть также выявлена при создании одинаковых по величине, но различных по знаку возмущений из одного и того же режима. В этих условиях в нелинейном объекте переходные процессы будут отличаться формой и, в частности, величиной остаточной неравномерности [156].

В [71] Н.С. Райбманом был предложен критерий, названный *относительной мерой нелинейности*. Этот критерий для статического объекта с единственным входом представляет собой следующую величину:

$$\gamma_{x/u}^2 = \frac{\eta_{x/u}^2 - r_{x/u}^2}{\eta_{x/u}^2}, \quad (3.7)$$

где $\eta_{x/u}^2$ - дисперсионное отношение, которое определяет тесноту функциональной зависимости входной переменной объекта U и выходной переменной X :

$$\eta_{x/u}^2 = \frac{D\{M\{X/u\}\}}{D\{X\}}. \quad (3.8)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $D\{X\}$ - дисперсия случайной величины выхода системы, $M\{X/u\}$ - регрессия выходной величины относительно входного воздействия; $r_{x/u}^2$ - квадрат коэффициента корреляции:

$$r_{x/u} = \frac{M\{(X - M\{X\})(\hat{M}\{X/u\} - M\{X\})\}}{\sqrt{D\{X\}D\{\hat{M}\{X/u\}\}}}, \quad (3.9)$$

$\hat{M}\{X/u\}$ - наилучшее в среднеквадратическом линейное приближение случайной величины X среди всех возможных линейных функций u (модель, в терминах которой осуществляется идентификация, в данном случае линейная параметрическая модель, полученная с использованием, например, метода наименьших квадратов):

$$M\{[X - \hat{M}\{X/u\}]^2\} = \min_{a_0, a_1} M\{[X - a_0 - a_1 u]^2\}. \quad (3.10)$$

Необходимо также отметить, что выполняется свойство регрессии [178]:

$$0 \leq \eta_{x/u}^2 \leq 1, \quad (3.11)$$

и свойство коэффициента корреляции:

$$0 \leq r_{x/u} \leq 1 \Rightarrow 0 \leq r_{x/u}^2 \leq 1. \quad (3.12)$$

Следовательно, получаем диапазон, в котором находятся значения относительной меры нелинейности:

$$0 \leq \gamma_{x/u}^2 \leq 1. \quad (3.13)$$

В случае линейности регрессии $M\{X/u\}$ величина $\gamma_{x/u}^2$ принимает нулевое значение, нелинейность системы приближает значение $\gamma_{x/u}^2$ к единице.

В [268] были введены непараметрические оценки дисперсионных и корреляционных характеристик, а также относительной степени нелинейности для статического случая.

Для проверки линейности динамических систем предложено также использовать критерий, принадлежащий к семейству относительной меры

нелинейности [71]. На основе критерия для статического случая (3.7), сконструирована относительная мера нелинейности для динамических систем, специально для случая, когда идентификация проводится с использованием непараметрического подхода. Предложенный критерий отличается от критериев линейности, предложенных в рамках дисперсионной теории идентификации для динамических систем [71].

Идея, лежащая в основе синтеза относительной меры нелинейности динамических систем, заключается в построении критерия, основанного на исследовании корреляционной связи непараметрической модели линейной динамики и статической оценки регрессии. Статическая модель применяется здесь для сглаживания выборочных значений выхода динамического объекта и выступает в роли некоторого аналога «истинной регрессии», в то время как линейная динамическая модель – это модель, в терминах которой проводится идентификация. Модифицированная относительная мера нелинейности имеет следующий вид [29], [16]:

$$\hat{\Gamma}_{x/t}^2 = \frac{\hat{N}_{x/t}^2 - \hat{R}_{x/t}^2}{\hat{N}_{x/t}^2}, \quad (3.14)$$

где $\hat{N}_{x/t}^2$ - оценка дисперсионного отношения [29], [16]:

$$\hat{N}_{x/t}^2 = \frac{\sum_{i=1}^s (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.15)$$

где $\{t_i, x_i\}$, $x_i = x(u(t_i))$, $i = 1, 2, \dots, s$ - выборочные значения реакции системы на тестовый сигнал $u(t)$ в дискретные моменты времени; \hat{x}_i - значения оценки регрессии; используется непараметрическая оценка регрессии для статического случая из класса H -аппроксимаций, построенная на выборке выходных значений динамического процесса с целью их сглаживания; \bar{x} - среднее значение выходной переменной, $\bar{x} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s x_i$; $\hat{R}_{x/t}^2$ - оценка коэффициента

корреляции в квадрате [16]:

$$\hat{R}_{x/t} = \frac{\sum_{i=1}^s [(x_i - \bar{x})(x_s(u(t_i)) - \bar{x}_s)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(u(t_i)) - \bar{x}_s)^2}}, \quad (3.16)$$

где $x_s(u(t_i))$, $i=1,2,\dots,s$ - реакция непараметрической модели линейной динамической системы (1.36) на тестовое входное воздействие; \bar{x}_s - среднее

значение выхода модели ЛДС: $\bar{x}_s = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s x_s(u(t_i))$.

Преимущество критерия относительной меры нелинейности (3.14) перед критерием среднеквадратической ошибки линейного описания процесса (3.6) заключается в том, что первый позволяет ввести некоторую относительную величину, значения которой лежат в ограниченном диапазоне, а именно, величина меры нелинейности $\hat{\Gamma}_{x/t}^2 \in (0 - \varepsilon; 1 + \varepsilon)$, где ε - ошибка оценивания. Величина ε зависит как от уровня помех, так и от объема тестовой выборки. Если система обладает свойством линейности, то $\hat{\Gamma}_{x/t}^2 \approx 0$. Принимая некоторый уровень значимости $\alpha > \varepsilon$, можно определить, является ли нелинейность существенной для данной задачи.

Недостатком критерия можно назвать чувствительность результатов к выбору тестового сигнала $u(t)$. Для выявления нелинейности необходимо избегать случаев, когда реакции объекта на тестовые сигналы могут быть коррелированы с реализацией переходной функции объекта, на основе которой строится непараметрическая модель динамики. Например, ступенчатые сигналы, имеющие различную амплитуду, в данном случае непригодны в качестве тестовых сигналов. Также желательно, чтобы тестовые сигналы охватывали наиболее полно весь допустимый для входной величины диапазон.

В работе были проведены эксперименты по проверке гипотезы линейности, основанные на исследовании критериев (3.6) и (3.14). Схема моделирования объекта имела вид, изображённый на рисунке 3.1.

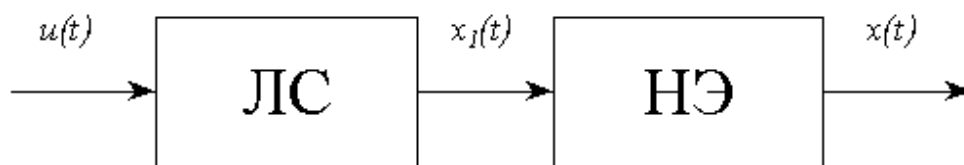


Рисунок 3.1. Схема модельного представления нелинейной системы
(ЛС - линейная система, НЭ - нелинейный элемент)

В качестве линейной компоненты объекта использована линейная разностная модель 3-го порядка (2.42). Нелинейный элемент представлял собой одно из следующих звеньев [187]:

1. Квадратор, заданный следующим соотношением:

$$x(t) = c \cdot (x_1(t))^2, \quad (3.17)$$

2. Звено насыщения (с порогом насыщения b):

$$x(t) = \begin{cases} x_1(t), & |x_1(t)| \leq b, \\ b, & x_1(t) > b, \\ -b, & x_1(t) < -b, \end{cases} \quad (3.18)$$

3. Элемент с зоной нечувствительности (величина нечувствительности a):

$$x(t) = \begin{cases} 0, & |x_1(t)| \leq a, \\ x_1(t) - a, & x_1(t) > a, \\ x_1(t) + a, & x_1(t) < -a. \end{cases} \quad (3.19)$$

Численные исследования включали эксперименты по изучению величин критериальных функций (3.6) и (3.14) для трех указанных нелинейных элементов и эталонной линейной системы [29]. В качестве тестовых сигналов взяты следующие функции:

$$u_1(t) = \sin\left(t \cdot \frac{2\pi}{T_p}\right), \quad (3.20)$$

$$u_2(t) = 2 \cdot \sin\left(t \cdot \frac{2\pi}{T_p}\right), \quad (3.21)$$

$$u_3(t) = 0.5 \cdot \sin\left(t \cdot \frac{2\pi}{T_p}\right), \quad (3.22)$$

где T_p - время регулирования системы. На численные значения выходных сигналов была наложена случайная аддитивная помеха, составляющая 5% от абсолютной величины сигнала.

На рисунках 3.2 - 3.3 изображены результаты экспериментов по изучению поведения критериев линейности с системой, содержащей элемент с зоной нечувствительности (3.19) при тестовом воздействии (3.20). Объем выборки был принят $s = 300$. На рисунке 3.2 [29] представлена зависимость величины критерия относительной меры нелинейности (3.14) от величины порога нечувствительности.

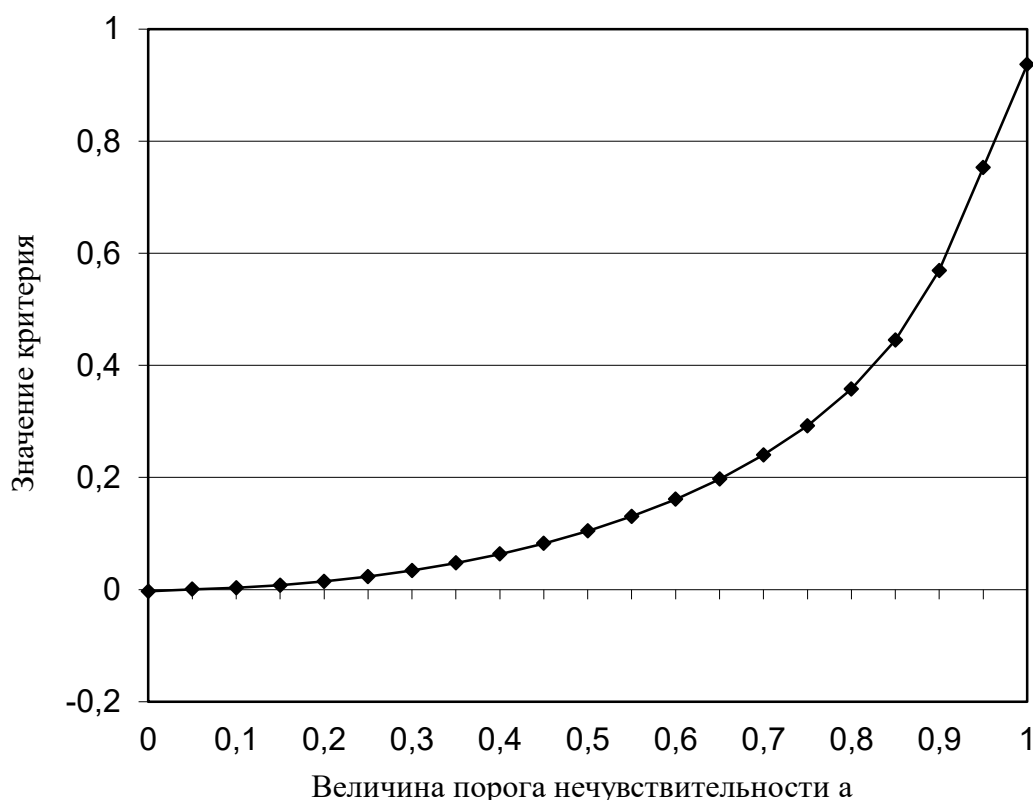


Рисунок 3.2. Зависимость критерия относительной меры нелинейности (3.14) от величины порога нечувствительности

Как видно из представленного графика, критерий относительной меры нелинейности принимал значения из диапазона $[0, 1]$. Значение критериальной функции возрастает при усилении влияния нелинейности. Аналогичный

эксперимент был проведен с критерием среднеквадратической ошибки моделирования линейной динамической системы (3.6). Результаты представлены на рисунке 3.3 [29].

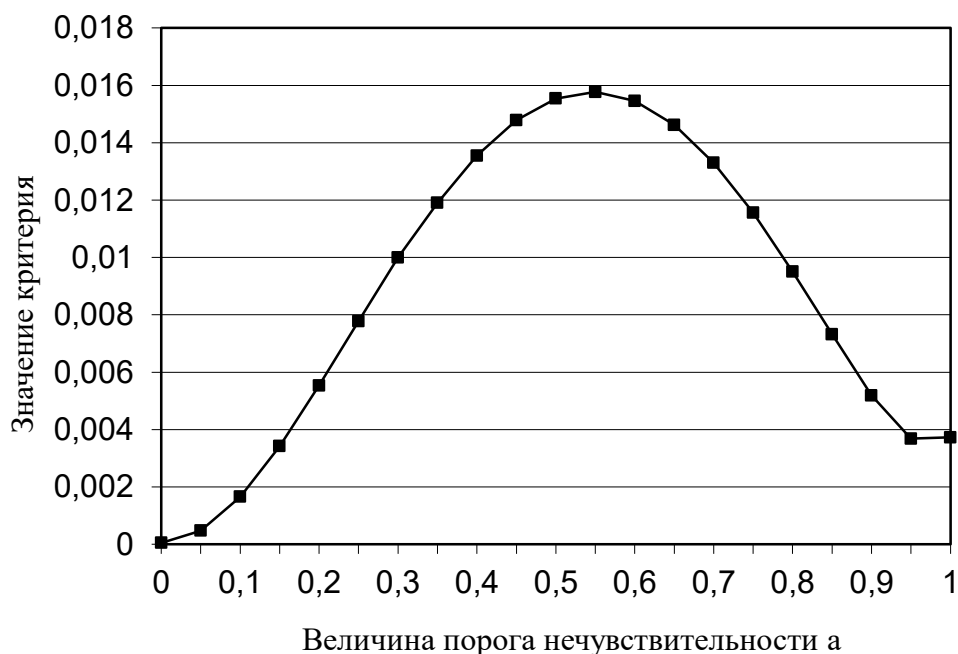


Рисунок 3.3. Зависимость критерия среднеквадратической ошибки моделирования (3.6) от величины порога нечувствительности

Величина критерия (3.6) для нелинейных систем с зоной нечувствительности возрастает до определённого значения порога нечувствительности, а затем она уменьшается. Возникновение этого эффекта можно объяснить следующим образом. При значительном пороге нечувствительности абсолютные значения выхода системы малы. Следовательно, уменьшается и погрешность идентификации системы в терминах линейных моделей.

Поведение критериев нелинейности здесь показало необходимость исследования обоих критериев для установления факта линейности. В противном случае нельзя достоверно судить о принадлежности системы к классу линейных или нелинейных.

На рисунках 3.4 и 3.5 [29] показаны зависимости значений критериев линейности от величины объема выборки измерений реакции системы на тестовый сигнал на входе. Представлен случай, когда система, содержала

элемент с зоной нечувствительности (3.19), порог нечувствительности $a = 0.2$, при тестовом воздействии (3.20). Случайная помеха составляла 5% от максимального значения, принимаемого выходной величиной системы.

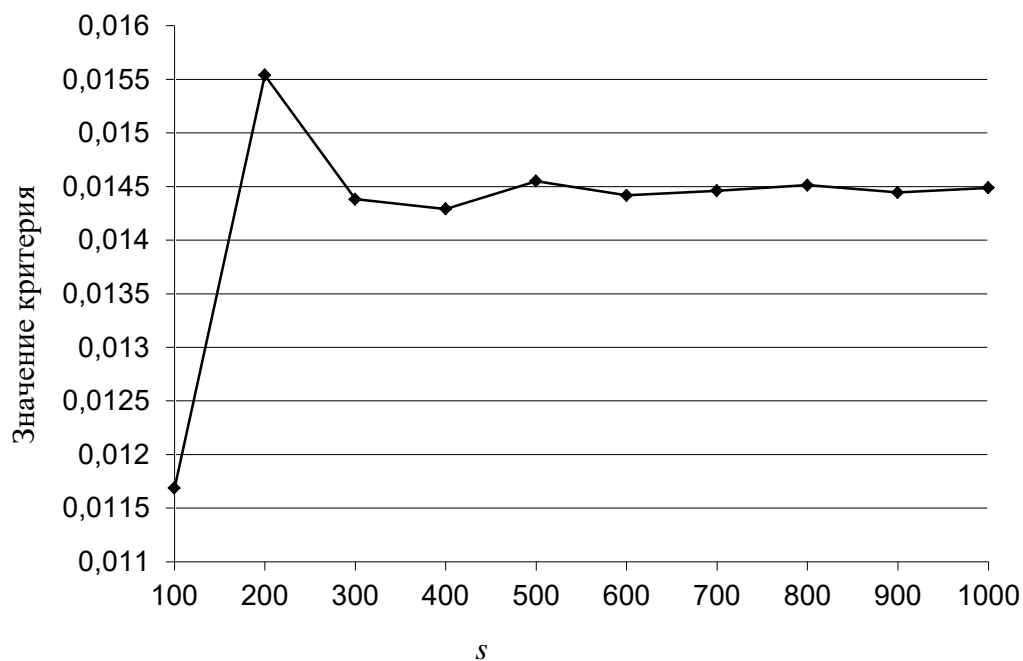


Рисунок 3.4. Зависимость критерия относительной меры нелинейности (3.14) от объема выборки

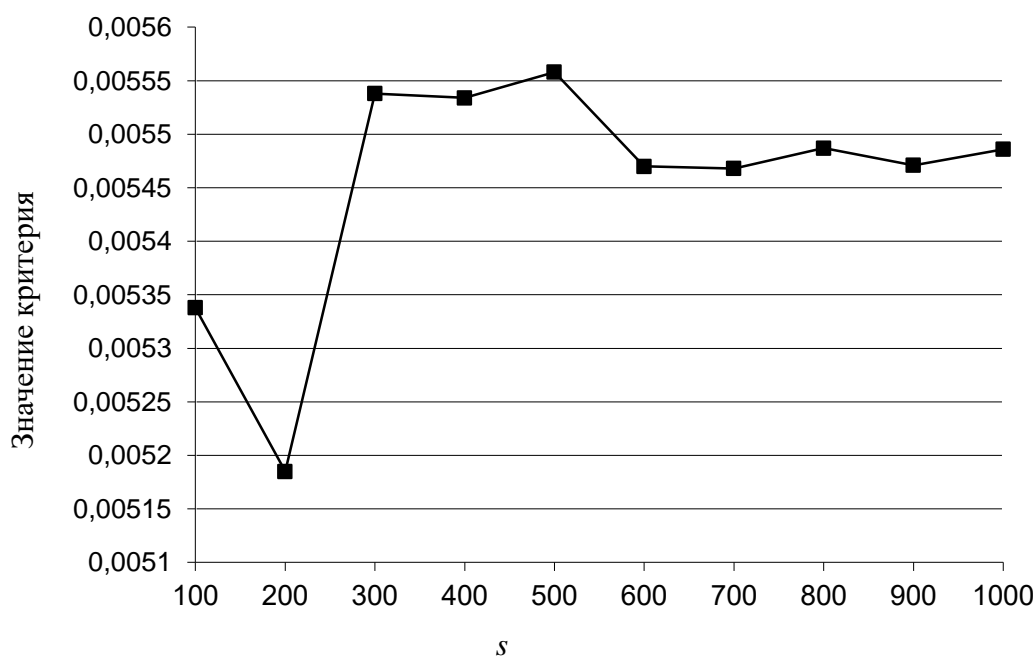


Рисунок 3.5. Зависимость критерия среднеквадратической ошибки моделирования (3.6) от объема выборки

Эксперименты показали, что при малых выборках значения обоих критериев неустойчивы, они могут меняться в широких пределах. При возрастании объема выборки, величины критериев становятся более стабильными. Это объясняется тем, что влияние случайной погрешности, содержащейся в тестовой выборке, с увеличением объема выборки перестает быть значительным из-за сглаживающего эффекта, присущего непараметрическим моделям.

На рисунках 3.6 - 3.7 [29] показаны значения критерия относительной меры нелинейности при различных тестовых сигналах. При этом представляется очевидным для системы с насыщением использовать тестовый сигнал с высокой амплитудой, нечувствительность же лучше определяется в результате эксперимента с пониженной амплитудой тестового воздействия относительно исходного ступенчатого сигнала.

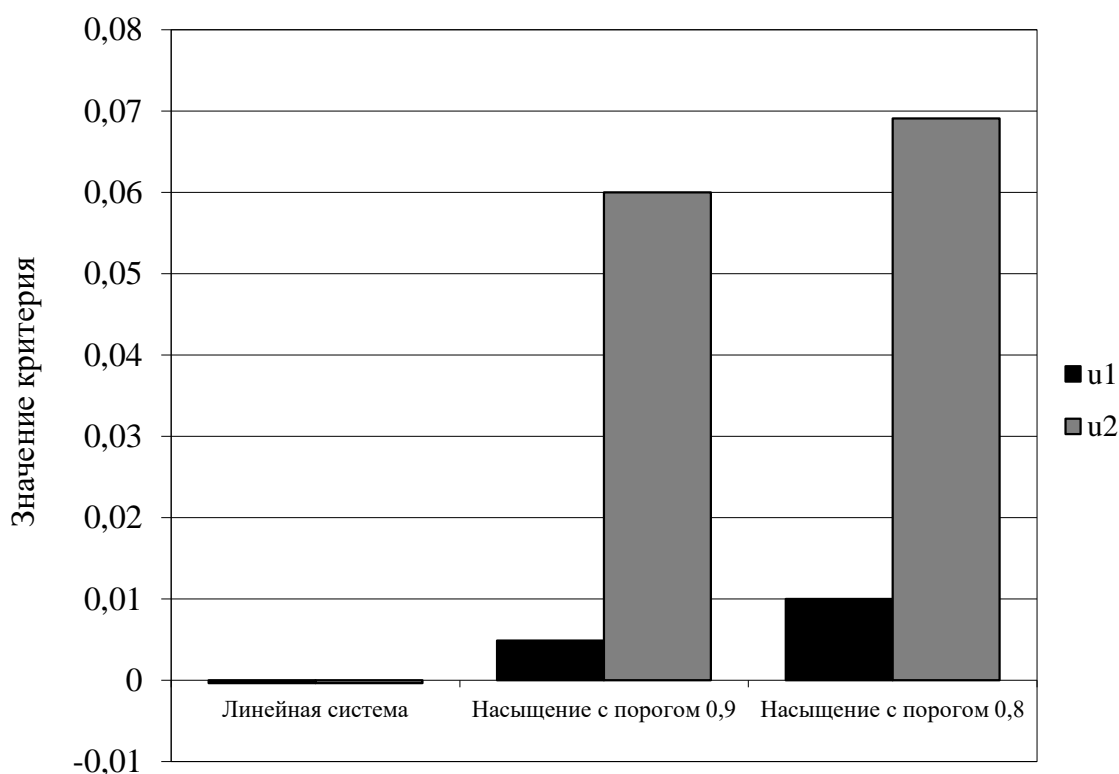


Рисунок 3.6. Значения относительной меры нелинейности систем с насыщением в сравнении с линейной системой

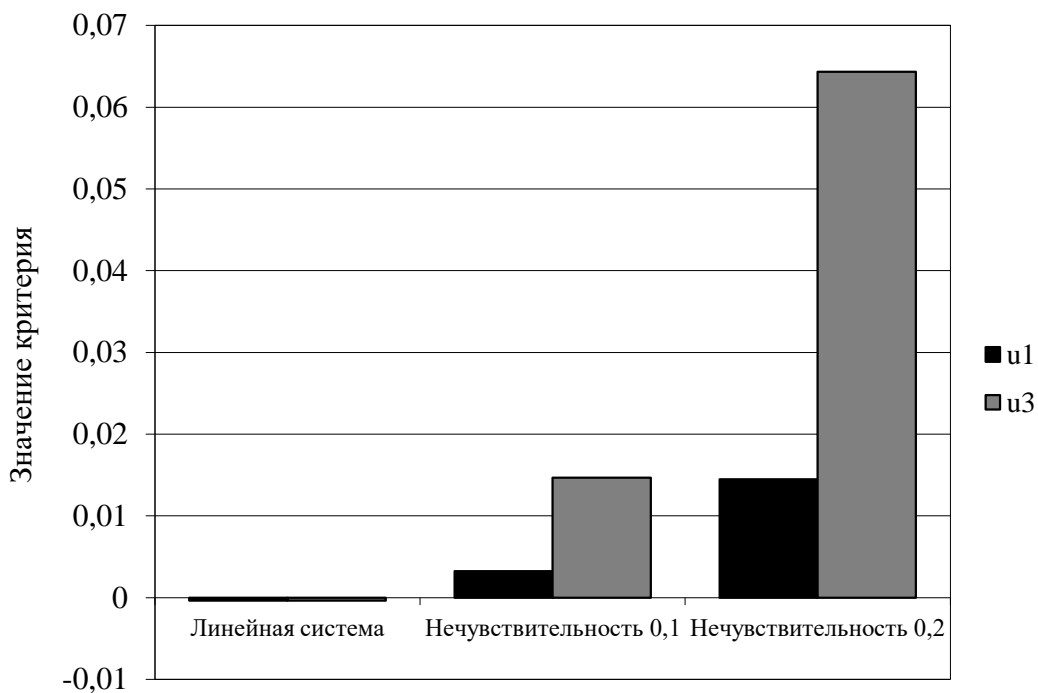


Рисунок 3.7. Значения относительной меры нелинейности систем с нечувствительностью в сравнении с линейной системой

Рисунки 3.8 - 3.9 иллюстрируют критерий нелинейности (3.6), основанный на исследовании среднеквадратической ошибки моделирования системы в результате экспериментов с тестовыми сигналами.

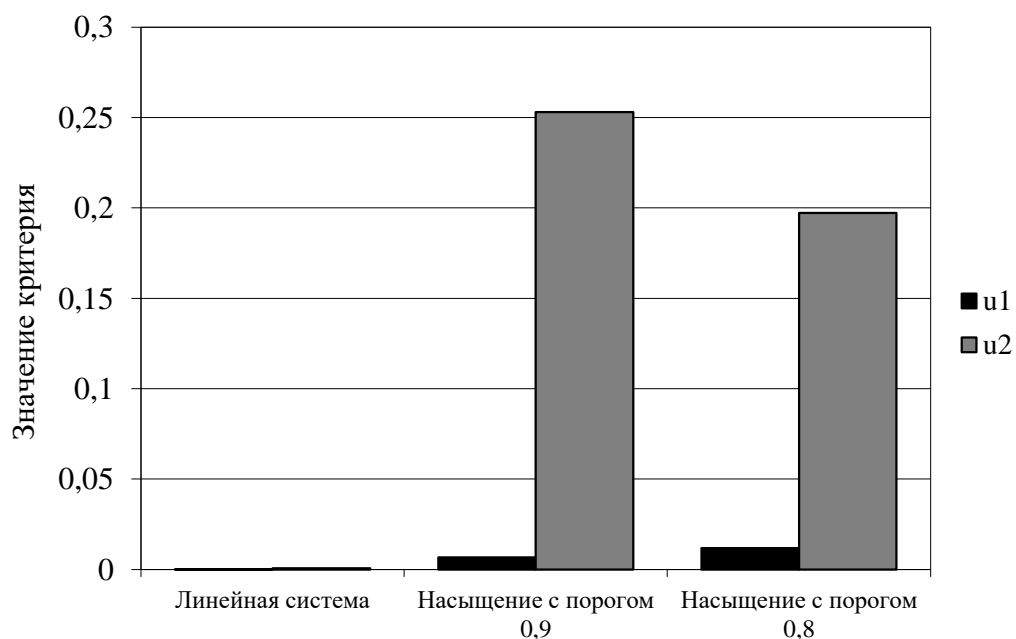


Рисунок 3.8. Среднеквадратическая ошибка моделирования систем с насыщением

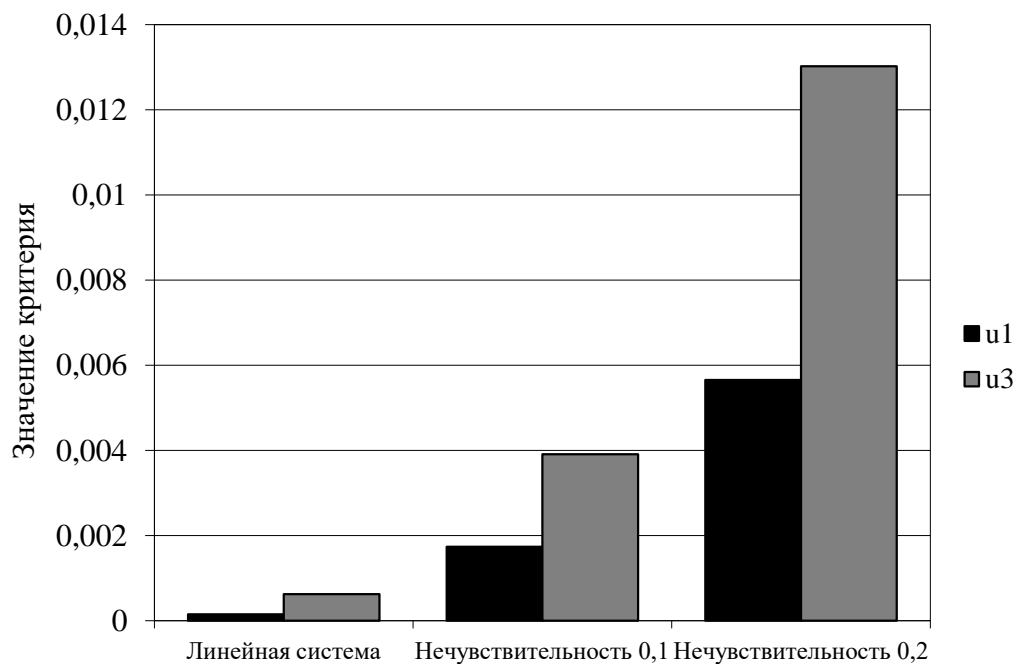


Рисунок 3.9. Среднеквадратическая ошибка моделирования систем с нечувствительностью

В случае, когда система существенно нелинейна (примером может служить эксперимент, когда в качестве нелинейного элемента вводился квадратор), значения критериев распределяются так, как показано на рисунках 3.10 - 3.11 [29].

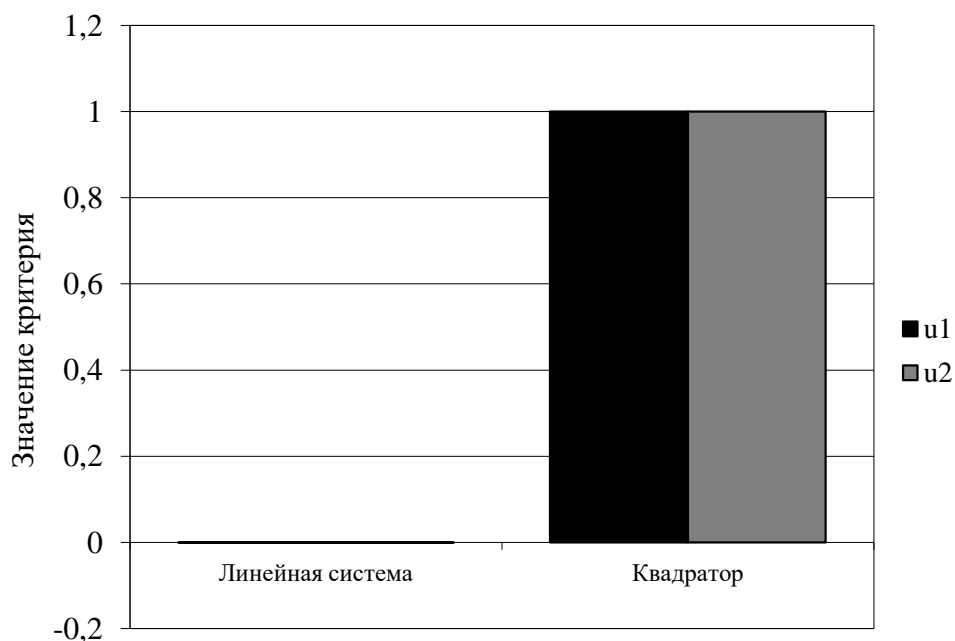


Рисунок 3.10. Относительная мера нелинейности системы с квадратором в сравнении с линейной системой

На рисунке 3.10 изображены значения относительной меры нелинейности при введении существенной нелинейности. В этом случае значения критерия относительной меры нелинейности для системы с квадратором приближаются к единице. На рисунке 3.11 представлены результаты эксперимента по изучению величины среднеквадратической ошибки при введении нелинейности типа квадратор.

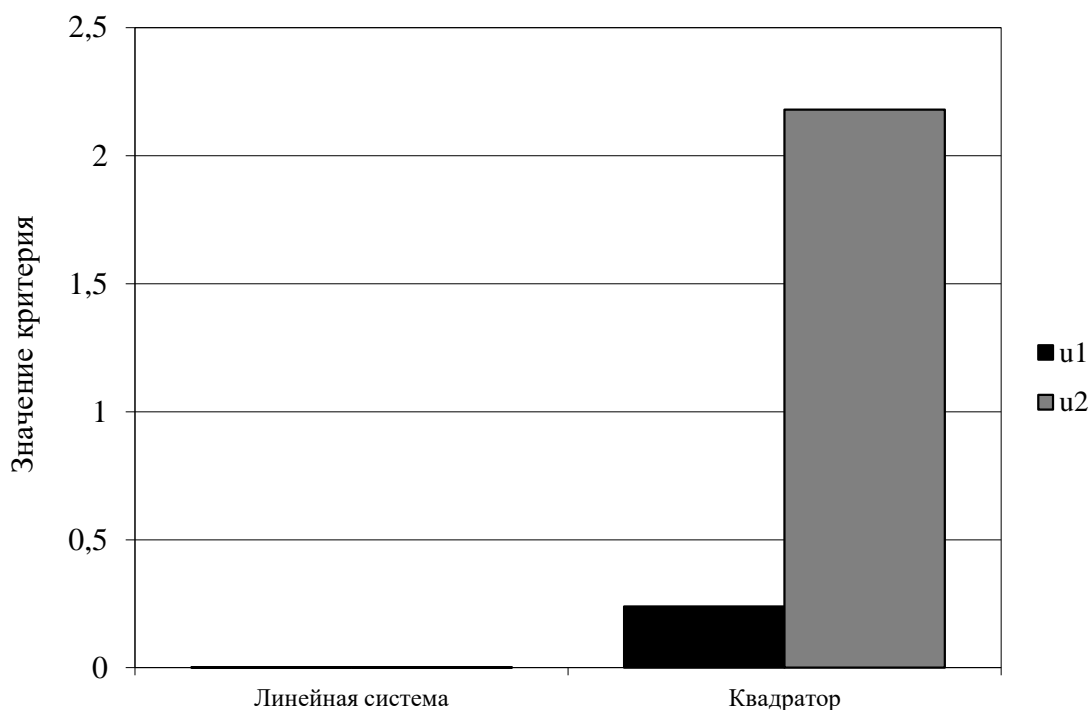


Рисунок 3.11. Среднеквадратическая ошибка моделирования системы с квадратором

Анализируя представленные графики, можно сделать вывод о том, что величина критерия для всех тестовых сигналов значительно меньше для линейной системы, чем для нелинейных систем. Полученные результаты позволяют сделать вывод о практической возможности исследования линейности динамической системы на основании её непараметрической модели.

Для идентифицируемости объекта в классе линейных систем необходимо, чтобы значение относительной степени нелинейности не превосходило некоторой заданной из априорных соображений величины. Достаточный

признак идентифицируемости по линейному приближению помимо названного условия предполагает также наличие идентифицируемости в пространстве состояний [71]. Косвенно, идентифицируемость в пространстве состояний в терминах линейных систем можно оценить при помощи среднеквадратической ошибки моделирования.

Опираясь на результаты проведённых экспериментов, можно дать следующие практические рекомендации. Значение пороговой величины относительной меры нелинейности во всех случаях было целесообразным взять в диапазоне от 0.001 до 0.01. В этом случае при удачном выборе тестовых сигналов и приемлемом уровне случайных помех можно сделать заключение о линейности исследуемого объекта. Гораздо сложнее дать рекомендации относительно величин пороговых значений среднеквадратической ошибки моделирования. Для конкретного объекта эта величина будет еще во многом зависеть от порядка величин выходных значений. Наиболее разумным представляется сравнивать величину среднеквадратической ошибки с дисперсией выходного сигнала. Если эти величины сопоставимы по величине, следует сделать вывод о неадекватном описании системы в терминах линейной модели, а значит о существенной нелинейности самого объекта.

Разнообразие типов нелинейностей, уровней значимости принятия решения о линейности объекта, амплитуд случайных помех в каналах измерения приводят к необходимости различного выбора пороговых значений критериев в каждом конкретном случае. Поэтому очевидно, что в реальных условиях принадлежность объекта к классу линейных будет определяться на основании заключения эксперта. Экспертная оценка будет основана, в том числе, и на вычисленных значениях относительной меры нелинейности и среднеквадратической ошибки моделирования системы в терминах линейных систем.

3.2. Сходимость критерия относительной меры нелинейности для динамических объектов

Теорема 3. *Необходимым условием линейности динамической системы является равенство [36]*

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \hat{\Gamma}_{x/t}^2 \right\} = 0. \quad (3.23)$$

Комментарий к теореме. Предполагается, что относительная мера нелинейности вычисляется на основании выборочных значений выходной величины системы, полученных в результате активного эксперимента над системой. То есть система не может находиться в установившемся режиме. Как следствие, при этом должно быть исключено равенство нулю дисперсии выхода системы.

Доказательство

Представим выражение для относительной меры нелинейности в следующем виде:

$$\hat{\Gamma}_{x/t}^2 = \frac{\hat{N}_{x/t}^2 - \hat{R}_{x/t}^2}{\hat{N}_{x/t}^2} = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^s [(x(t_i) - \bar{x})(x_s(t_i) - \bar{x}_s)] \right)^2}{\sum_{i=1}^s (\hat{x}(t_i) - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(t_i) - \bar{x}_s)^2}.$$

Необходимо доказать тождество:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \frac{\left(\sum_{i=1}^s [(x(t_i) - \bar{x})(x_s(t_i) - \bar{x}_s)] \right)^2}{\sum_{i=1}^s (\hat{x}(t_i) - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(t_i) - \bar{x}_s)^2} \right\} = 1.$$

Введем обозначения: $\varphi_s = \left(\sum_{i=1}^s [(x(t_i) - \bar{x})(x_s(t_i) - \bar{x}_s)] \right)^2$,

$$p_s = \sum_{i=1}^s (\hat{x}(t_i) - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(t_i) - \bar{x}_s)^2, \quad y_s = \frac{\varphi_s}{p_s}.$$

Для доказательства воспользуемся следующим приемом:

$$M\{y_s\} = M\{y_s\} + \frac{M\{\varphi_s\}}{M\{p_s\}} - \frac{M\{\varphi_s\}}{M\{p_s\}} = \frac{M\{\varphi_s\}}{M\{p_s\}} + \frac{M\{y_s\}M\{p_s\} - M\{\varphi_s\}}{M\{p_s\}},$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M\{y_s\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{M\{\varphi_s\}}{M\{p_s\}} + \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{M\{y_s\}M\{p_s\} - M\{\varphi_s\}}{M\{p_s\}}.$$

Отсутствие корреляционной зависимости y_s и p_s в пределе приводит к следующему тождеству:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M\{y_s\} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{M\{\varphi_s\}}{M\{p_s\}}.$$

Таким образом, доказательство Теоремы сводится к доказательству равенства:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\sum_{i=1}^s (\hat{x}(t_i) - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(t_i) - \bar{x}_s)^2\right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\left(\sum_{i=1}^s [(x(t_i) - \bar{x})(x_s(t_i) - \bar{x}_s)]\right)^2\right\}.$$

Левая часть равенства:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\sum_{i=1}^s (\hat{x}(t_i) - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(t_i) - \bar{x}_s)^2\right\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\sum_{i=1}^s (\hat{x}(t_i) - \bar{x})^2 (x_s(t_i) - \bar{x}_s)^2\right\} + \\ &+ \lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\sum_{i=1}^s \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^s (\hat{x}(t_i) - \bar{x})^2 (x_s(t_j) - \bar{x}_s)^2\right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\sum_{i=1}^s (\hat{x}^2(t_i) x_s^2(t_i) - \right. \\ &- 2\hat{x}^2(t_i) x_s(t_i) \bar{x}_s + \hat{x}^2(t_i) \bar{x}_s^2 - 2\hat{x}(t_i) \bar{x} x_s^2(t_i) + 4\hat{x}(t_i) x_s(t_i) \bar{x} \bar{x}_s - 2\hat{x}(t_i) \bar{x} \bar{x}_s^2 + \\ &+ \bar{x}^2 x_s^2(t_i) - 2x_s(t_i) \bar{x}_s \bar{x}^2 + \bar{x}^2 \bar{x}_s^2) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^s \sum_{j=1}^s (\hat{x}^2(t_i) x_s^2(t_j) - \\ &- 2\hat{x}^2(t_i) x_s(t_j) \bar{x}_s + \hat{x}^2(t_i) \bar{x}_s^2 - 2\hat{x}(t_i) \bar{x} x_s^2(t_j) + 4\hat{x}(t_i) x_s(t_j) \bar{x} \bar{x}_s - 2\hat{x}(t_i) \bar{x} \bar{x}_s^2 + \\ &\left. + \bar{x}^2 x_s^2(t_j) - 2x_s(t_j) \bar{x}_s \bar{x}^2 + \bar{x}^2 \bar{x}_s^2)\right\}. \end{aligned}$$

Правая часть равенства:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\left(\sum_{i=1}^s (x(t_i) - \bar{x})(x_s(t_i) - \bar{x}_s)\right)^2\right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} M\left\{\sum_{i=1}^s [(x(t_i) - \bar{x})^2 (x_s(t_i) - \bar{x}_s)^2]\right\} +$$

$$\begin{aligned}
& + \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^s \sum_{j=1}^s (x(t_i) - \bar{x})(x(t_j) - \bar{x})(x_s(t_i) - \bar{x}_s)(x_s(t_j) - \bar{x}_s) \right\} = \\
& = \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \sum_{i=1}^s \left(x^2(t_i) x_s^2(t_i) - 2x^2(t_i) x_s(t_i) \bar{x}_s + x^2(t_i) \bar{x}_s^2 - 2x(t_i) \bar{x} x_s^2(t_i) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 4x(t_i) x_s(t_i) \bar{x} \bar{x}_s - 2x(t_i) \bar{x} \bar{x}_s^2 + \bar{x}^2 x_s^2(t_i) - 2\bar{x}^2 x_s(t_i) \bar{x}_s + \bar{x}^2 \bar{x}_s^2 \right) + \right. \\
& \quad \left. + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^s \sum_{j=1}^s \left(x(t_i) x(t_j) x_s(t_i) x_s(t_j) - x(t_i) x(t_j) x_s(t_i) \bar{x}_s - x(t_i) x_s(t_i) x_s(t_j) \bar{x} + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + x(t_i) x_s(t_i) \bar{x} \bar{x}_s - x(t_i) x(t_j) x_s(t_j) \bar{x}_s + x(t_i) x(t_j) \bar{x}_s^2 + x(t_i) x_s(t_j) \bar{x} \bar{x}_s - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - x(t_i) \bar{x} \bar{x}_s^2 - x(t_j) x_s(t_i) x_s(t_j) \bar{x} + x(t_j) x_s(t_i) \bar{x} \bar{x}_s + x_s(t_i) x_s(t_j) \bar{x}^2 - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - x_s(t_i) \bar{x}_s \bar{x}^2 + x(t_j) x_s(t_j) \bar{x} \bar{x}_s - x(t_j) \bar{x} \bar{x}_s^2 - x_s(t_j) \bar{x}_s \bar{x}^2 + \bar{x}^2 \bar{x}_s^2 \right) \right\}.
\end{aligned}$$

В случае, когда система является линейной, непараметрические оценки $\hat{x}(t)$ и $x_s(t)$ асимптотически несмещённые и сходятся в среднеквадратическом.

То есть, справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
\lim_{s \rightarrow \infty} M \{ \hat{x}(t) \} &= \tilde{x}(t), \quad \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ x_s(t) \} = \tilde{x}(t), \quad \text{где } \tilde{x}(t) = M \{ x/t \}, \\
\lim_{s \rightarrow \infty} M \{ \hat{x}^2(t) \} &= \tilde{x}^2(t), \quad \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ x_s^2(t) \} = \tilde{x}^2(t).
\end{aligned}$$

В силу неравенства Коши-Буняковского

$$|K \{ \hat{x}(t), x_s(\tau) \}| \leq \sqrt{M \{ (\hat{x}(t) - M \{ \hat{x}(t) \})^2 \}} \cdot \sqrt{M \{ (x_s(\tau) - M \{ x_s(\tau) \})^2 \}},$$

Отсюда $\lim_{s \rightarrow \infty} |K \{ \hat{x}(t), x_s(\tau) \}| \leq 0 \Rightarrow \lim_{s \rightarrow \infty} K \{ \hat{x}(t), x_s(\tau) \} = 0$.

Таким образом, имеем $\lim_{s \rightarrow \infty} K \{ \hat{x}^2(t), x_s^2(\tau) \} = 0$.

Далее покажем равенство полученных выражений через доказательство почленного равенства их слагаемых.

$$1. \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ \hat{x}^2(t_i) x_s^2(t_j) \} = \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ \hat{x}^2(t_i) \} M \{ x_s^2(t_j) \} + \lim_{s \rightarrow \infty} K \{ \hat{x}^2(t_i), x_s^2(t_j) \} =$$

$$= \tilde{x}^2(t_i) \tilde{x}^2(t_j),$$

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ \{x(t_i) x(t_j) x_s(t_i) x_s(t_j)\} \} &= \lim_{s \rightarrow \infty} \tilde{x}(t_i) \tilde{x}(t_j) M \{x_s(t_i)\} M \{x_s(t_j)\} = \\ &= \tilde{x}^2(t_i) \tilde{x}^2(t_j). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ \hat{x}^2(t_i) x_s(t_j) \overline{x_s} \} &= \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \hat{x}^2(t_i) x_s(t_j) \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s x_s(t_k) \right\} = \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ \hat{x}^2(t_i) \} M \left\{ x_s(t_j) \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s x_s(t_k) \right\} = \end{aligned}$$

$$= \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{s} M \{ \hat{x}^2(t_i) \} M \{ x_s(t_j) \} \sum_{k=1}^s M \{ x_s(t_k) \} = \tilde{x}^2(t_i) \tilde{x}(t_j) \overline{x},$$

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \infty} M \{ x(t_i) x(t_j) x_s(t_i) \overline{x_s} \} &= \lim_{s \rightarrow \infty} \tilde{x}(t_i) \tilde{x}(t_j) M \{ x_s(t_i) \} M \left\{ \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s x_s(t_k) \right\} = \\ &= \tilde{x}^2(t_i) \tilde{x}(t_j) \overline{x}. \end{aligned}$$

Равенство остальных слагаемых показывается аналогично. Окончательно, приходим к следующему выводу:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \sum_{i=1}^s (\hat{x}(t_i) - \overline{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(t_i) - \overline{x_s})^2 \right\} = \lim_{s \rightarrow \infty} M \left\{ \left(\sum_{i=1}^s [(x(t_i) - \overline{x})(x_s(t_i) - \overline{x_s})] \right)^2 \right\}.$$

Теорема доказана.

3.3. Синтез адаптивного алгоритма управления линейными динамическими системами

Процедура проверки гипотезы о линейности позволяет убедиться в принадлежности изучаемой системы к классу линейных. На практике же особый интерес, тем не менее, вызывают подходы к изучению нелинейных систем. Исследования специфических методов идентификации и управления для нелинейных систем сталкиваются с их сложностью и отсутствием общей теории нелинейных систем. Тем не менее, некоторые попытки предпринимаются, в том числе и с участием автора диссертации [15].

Предлагаемая в диссертации методология, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение при работе с нелинейными системами предполагает процесс линеаризации их моделей, то есть сведение задачи к более простой и доступной к решению. При этом требуется изучение и использование дополнительных инструментов, в том числе адаптивных непараметрических алгоритмов управления линейными системами.

Современная теория управления линейными процессами достаточно хорошо развита. В частности разработаны принципы оптимального управления [192] и др. Однако, для применения методов теории оптимального управления, других классических подходов необходимо обладать исчерпывающими знаниями об объекте управления. На практике исследователь чаще всего сталкивается с неполнотой априорной информации, влиянием случайных помех. В этих условиях необходима разработка новых методов и алгоритмов управления, учитывающих указанные особенности постановки задачи.

Для управления линейными динамическими процессами в настоящее время широко используются П-, ПИ- и другие типовые регуляторы [46], [95], [173]. Основная задача в этом случае сводится к настройке параметров регуляторов, обеспечивающих удовлетворительное качество управления. Однако, широко используемые законы регулирования являются далеко не лучшими, что приводит к естественным потерям. Причем эти потери будут тем более значительными, чем более высок порядок уравнения, описывающего процесс.

Задача *управления* состоит в том, чтобы посредством соответствующего выбора входного воздействия обеспечить желаемое поведение выходного сигнала системы [120]. В частности, непараметрический подход к идентификации линейных динамических объектов, может служить основой построения линейного непараметрического регулятора. Реализуется разомкнутая и замкнутая схемы управления ЛДС, когда регулятор синтезируется на основе непараметрической модели системы.

Исследуемый подход к синтезу регулятора сводится к тому, что по

измеренным значениям наблюдений управляемого входного воздействия $u_i, i=1,2,\dots,s$ и выходного сигнала x_i требуется построить модель линейной динамической системы. Следующий этап состоит в том, что эта модель используется для «снятия» переходных характеристик, на основе которых и синтезируется непараметрический регулятор [28], [106], [131], [224].

Линейное преобразование входных сигналов $u \in U$ в выходные $x \in X$ можно рассматривать как линейный оператор, действующий на множестве входных сигналов U , в общем случае U может быть из множества выходных сигналов X , переводящий U в X . Другими словами:

$$x(t) = A \cdot u(t), \quad (3.24)$$

где A - линейный оператор.

Если линейный оператор A осуществляет взаимно-однозначное отображение пространства U в X , то существует линейный и ограниченный обратный оператор A^{-1} , отображающий X в U [69], [97]:

$$u(t) = A^{-1} \cdot x(t). \quad (3.25)$$

Если найти обратный оператор A^{-1} для данной линейной системы и «включить» на входе системы A , то, подавая на вход требуемую траекторию движения процесса $x^*(t)$, получим:

$$x^*(t) = A \cdot u^*(t) = A \cdot A^{-1} x^*(t) = x^*(t), \quad (3.26)$$

где $A \cdot A^{-1} = I$ - единичный оператор.

Схематически эта идея представлена на рисунке 3.12 [108].

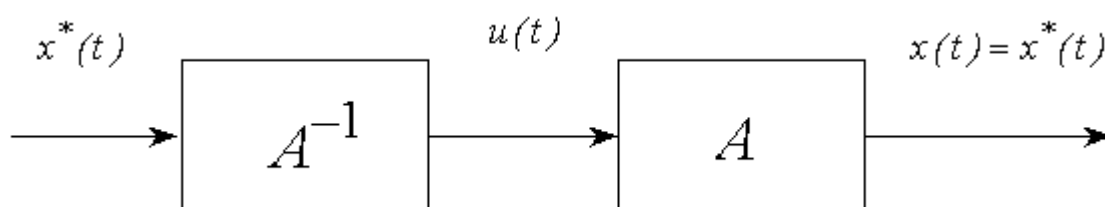


Рисунок 3.12. Структурная схема функционирования непараметрического регулятора ЛДС

Система управления в таком случае является разомкнутой, ее структурная

схема состоит из последовательного соединения регулятора и управляемого объекта.

Ранее считалось, что подход к построению разомкнутых систем управления имеет ограниченное практическое значение [105]. Разомкнутая схема управления использовалась в системах программного управления. В методическом же отношении задача нахождения программной функции системы способствовала пониманию проблематики теории автоматического управления с позиций обратных задач динамики. А также, задача осуществления назначенной траектории движения породила идею построения процедуры параметрической оптимизации динамической системы с требуемыми характеристиками [105]. С развитием непараметрических подходов к построению моделей линейной динамики идея осуществления разомкнутой системы управления динамическими объектами приобрела новое содержание. Обратный оператор линейной системы не может быть получен в классе ограниченных функционалов, однако, он может быть оценен на основе выборок «вход-выход» объекта управления.

Синтезируя непараметрический регулятор ЛДС, следует принимать во внимание тот факт, что непараметрическое оценивание на основании информации, содержащейся в случайной выборке измерений «вход-выход» объекта управления, не позволяет получить «идеальную» оценку обратного оператора, а значит и «безупречный» закон регулирования. Более того, непараметрический регулятор настраивается с использованием модели, а функционирует уже с реальным объектом. Со временем может также происходить дрейф характеристик объекта, что приведет к резкому ухудшению процесса регулирования. Всё вышесказанное указывает на то, что в практических приложениях невозможно обойтись без дополнительного регулятора, включенного в цепь обратной связи. Этот дополнительный регулятор устранил возможные неточности регулирования, вызванные погрешностью непараметрической оценки обратного оператора ЛДС.

Замкнутая схема регулирования представлена на рисунке 3.13 [36].

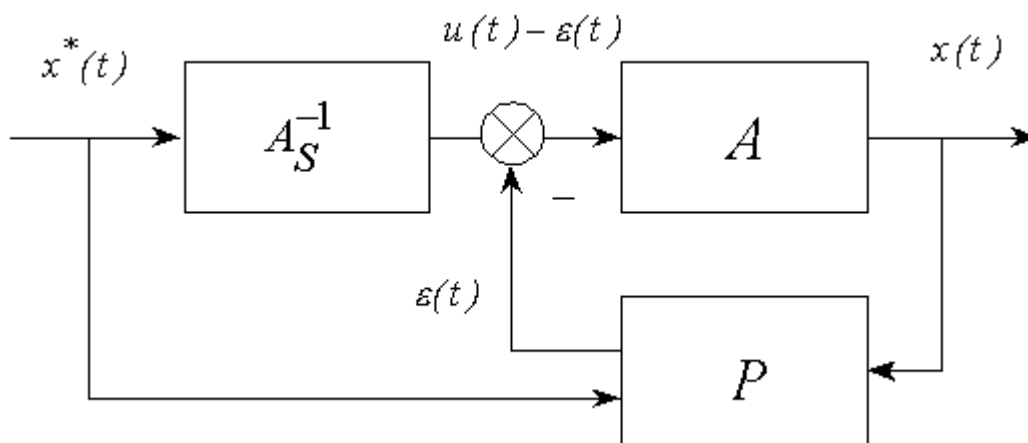


Рисунок 3.13. Замкнутая схема управления ЛДС

Здесь P - стандартный регулятор типа ПИ, ПИД, $\varepsilon(t)$ - сигнал, вырабатываемый регулятором в цепи обратной связи.

В случае реализации замкнутой схемы управления управляющее воздействие включает две составляющие:

$$u(t) = A^{-1} \cdot x^*(t) - \varepsilon(t, x^*(t)). \quad (3.27)$$

Первое слагаемое содержит знание об объекте управления, оно формирует задающее воздействие для достижения желаемого отклика объекта, второе - корректирует отклонение управляемой величины, компенсируя неточности и влияние случайных помех.

Непараметрический алгоритм управления ЛДС. Рассмотрим идею осуществления разомкнутой системы управления для случая описания ЛДС с помощью интеграла Дюамеля:

$$x(t) = h(0)u(t) + \int_0^t g(\tau)u(t-\tau) d\tau, \quad (3.28)$$

где $h(t)$ и $g(t)$ - соответственно переходная и импульсная переходная функции системы. Этот оператор имеет непрерывное ядро $h(t)$ и действует в пространстве непрерывных функций. Он является ограниченным оператором. Оператор, обратный к (3.28) тоже будет линейным и ограниченным оператором [97] и может быть описан аналогично интегралом свертки:

$$u(t) = A^{-1}x(t) = w(0)x(t) + \int_0^t v(\tau)x(t-\tau) d\tau, \quad (3.29)$$

где $w(t)$ и $v(t)$ - соответственно переходная и импульсная переходная функции «обратного» процесса.

Таким образом, $w(t)$ и $v(t)$ могут быть интерпретированы как переходные характеристики процесса в направлении «выход-вход». На реальном объекте снять такие характеристики нельзя. Но, учитывая то, что мы располагаем непараметрической моделью исследуемой системы, можно получать эти характеристики на модели.

В [259] были предложены непараметрические модели линейных динамических систем. Пусть на вход ЛДС подано единичное входное воздействие $1(t)$, $0 < t < T$, где T - длительность переходного процесса (время регулирования). Обозначим $\{t_i, h_i\}$, $i = 1, 2, \dots, s$ реализацию наблюдений переходной функции объекта. Наблюдения переходной функции осуществляются в дискретном времени через интервал Δt со случайной статистически независимой помехой с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией. На основании выборки строятся непараметрические оценки переходной функции $h_s(t)$ и импульсной переходной функции $g_s(t)$. Алгоритмы построения этих оценок и их настройки обсуждались в первой главе диссертации.

Идея непараметрического оценивания обратного оператора ЛДС рассматривалась в [131], [259]. В основе её реализации лежит решение системы уравнений:

$$x_s(t) = h_s(0)u(t) + \int_0^t g_s(\tau)u(t - \tau) d\tau = 1(t), \quad \forall t \in [0, T] \quad (3.30)$$

относительно $u(t)$ в дискретные моменты времени, а именно:

$$\sum_{k=0}^{t/\Delta\tau} \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s^H} \right) u(t - k\Delta\tau) \Delta\tau = \frac{C_s^H}{\Delta t} - \frac{C_s^H}{C_s^I} u(t) \sum_{i=1}^s h_i H \left(\frac{-t_i}{C_s^I} \right), \quad (3.31)$$

где $\Delta\tau$ - величина шага численного интегрирования, C_s^I и C_s^H - оптимальные параметры размытости для оценок $h_s(t)$ и $g_s(t)$.

Пусть выход непараметрической модели $x_s(t) = 1(t) \forall t \in [0, T]$, тогда $u(t)$ - есть переходная характеристика процесса в направлении «выход-вход» $\{w(t)\}$. Решая уравнение (3.31) относительно $w(t)$, получим реализацию переходной функции системы в направлении «выход-вход» [37], [224], [227]:

$$\begin{aligned} & \frac{C_s^{II}}{\Delta t} - \frac{C_s^{II}}{C_s^I} u(t) \sum_{i=1}^s h_i H \left(\frac{-t_i}{C_s^I} \right) = \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{0-t_i}{C_s^{II}} \right) w(t) \Delta \tau + \\ & + \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{\Delta \tau - t_i}{C_s^{II}} \right) w(t - \Delta \tau) \Delta \tau + \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{2\Delta \tau - t_i}{C_s^{II}} \right) w(t - 2\Delta \tau) \Delta \tau + \dots \\ & \dots + \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{t-t_i}{C_s^{II}} \right) w(0) \Delta \tau. \\ w(t) = & \frac{\frac{C_s^{II}}{\Delta t} - \frac{C_s^{II}}{C_s^I} u(t) \sum_{i=1}^s h_i H \left(\frac{-t_i}{C_s^I} \right) - \Delta \tau \sum_{k=0}^{\frac{t-\Delta \tau}{\Delta \tau}} \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{k\Delta \tau - t_i}{C_s^{II}} \right) w(t - k\Delta \tau)}{\frac{C_s^{II}}{C_s^I} \Delta \tau \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{-t_i}{C_s^I} \right)}, \quad (3.32) \end{aligned}$$

где $w(0) = 0$.

Таким образом, получена реализация объема s наблюдений «входной переменной» модели при условии $x_s(t) = 1(t) \forall t \in [0, T]$. Теперь можно перейти к оцениванию оператора системы в направлении «выход-вход» (3.29). В частности, при нулевых начальных условиях непараметрическая оценка управляющего воздействия принимает вид:

$$u_s^*(t, C_s^{III}) = \frac{T}{s C_s^{III}} \sum_{k=0}^{t/\Delta \tau} \sum_{i=1}^s w_i H' \left(\frac{k\Delta \tau - t_i}{C_s^{III}} \right) x^*(t - k\Delta \tau) \Delta \tau, \quad (3.33)$$

где C_s^{III} - параметр размытости для непараметрического регулятора.

Оптимизация непараметрического регулятора. Существенным для построения переходной характеристики регулятора является определение параметра размытости. В отличие от задачи непараметрического моделирования ЛДС, где для идентификации динамического процесса в одномерном случае требуется два параметра – для оценки переходной и

импульсной переходной функций ЛДС, задача построения регулятора включает выбор еще одного параметра.

Параметры C_s^I и C_s^{II} используются в алгоритмах оценивания переходной и импульсной переходной функций динамического процесса и для получения реализации переходной функции процесса в направлении «выход-вход» (3.32).

Параметр C_s^{III} используется для оценивания управляющего воздействия (3.33). Выбор осуществляется в результате оптимизации критерия следующего вида:

$$W = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s [x_s(t_i, C_s^I, C_s^{II}, C_s^{III}) - x^*(t_i)]^2 \rightarrow \min_{C_s^{III}}, \quad (3.34)$$

где $t_i, i=1, 2, \dots, s$ - дискретные значения переменной t , взятые с интервал, равным шагу выборки, $x^*(t_i)$ - желаемое значение выхода, $x_s(t_i, C_s^I, C_s^{II}, C_s^{III})$ - выход непараметрической модели ЛДС, когда входное воздействие формируется непараметрическим регулятором:

$$x_s(t, C_s^I, C_s^{II}, C_s^{III}) = h_s(0, C_s^I) u_s^*(t, C_s^{III}) + \int_0^t g_s(\tau, C_s^{II}) u_s^*(t - \tau, C_s^{III}) d\tau. \quad (3.35)$$

Для оптимизации критерия (3.34) в качестве желаемого значения выхода $x^*(t_i)$ была взята ступенчатая функция, заданная на всем интервале времени регулирования в дискретные моменты времени. Для численных экспериментов использовалась единичная функция Хэвисайда.

В ходе компьютерного моделирования для оптимизации был использован метод золотого сечения. Выбор метода нулевого порядка обусловлен тем, что производные критериальной функции недоступны, временные и информационные ресурсы ограничены. «Цена» каждого значения критериальной функции в практических задачах при достаточно больших выборках может быть значительной. Данный метод позволяет за достаточно малое число шагов достигнуть точки минимума. Практические указания к

выбору интервала и точности оптимизации позволяют сократить число шагов оптимизации до 14-16, что является допустимым.

На рисунках 3.14 - 3.15 приведены критериальные функции W , полученные в результате экспериментов над моделями для различных значений объема выборки [3].

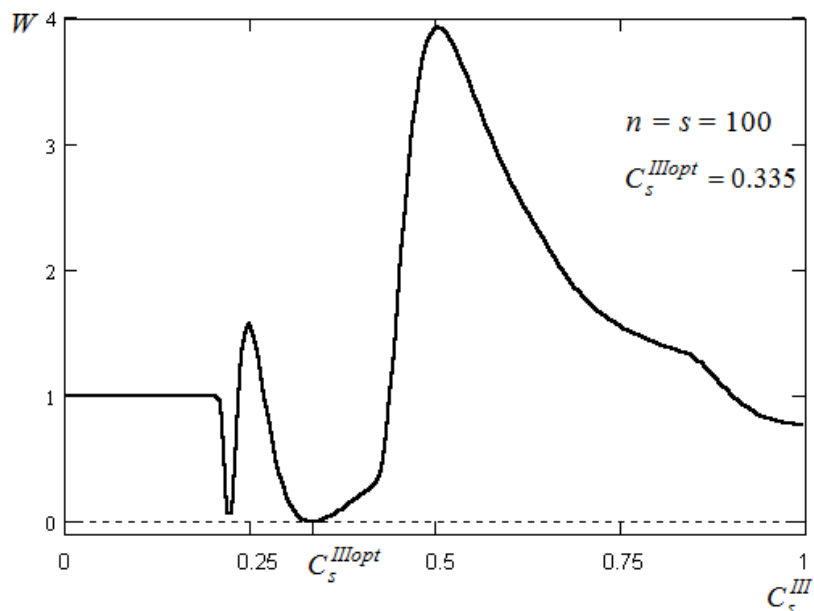


Рисунок 3.14. Критериальная функция (3.34) для выборки $n = s = 100$

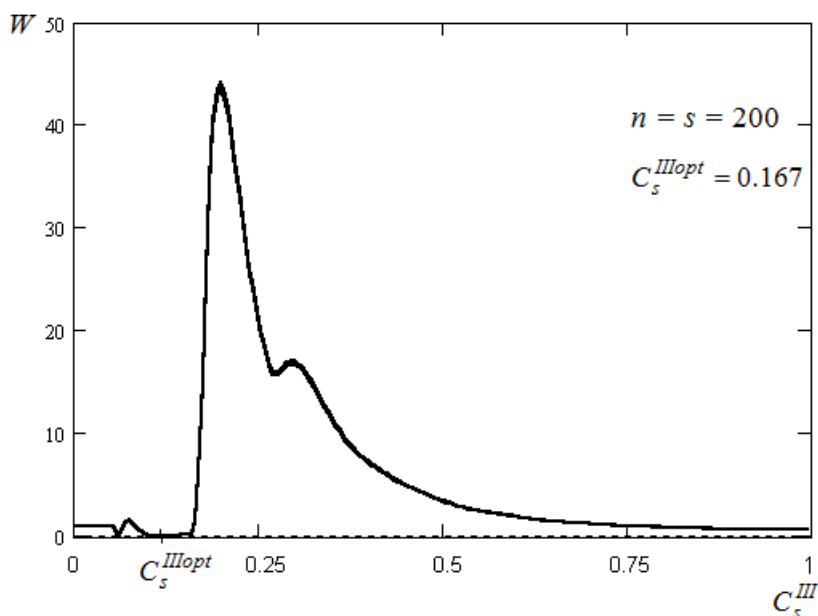


Рисунок 3.15. Критериальная функция (3.34) для выборки $n = s = 200$

Многоэкстремальность критерия (3.34), приводит к проблеме поиска границ, в которых отыскивается оптимальное значение параметра. Численные

эксперименты показали, что наиболее целесообразно устанавливать эти границы таким образом, чтобы исключить «попадание» процесса оптимизации в область притяжения минимума, сравнимого либо превышающего оптимальное значение параметра C_s^{II} , найденное на предыдущей стадии работы алгоритма. Это объясняется стремлением синтезировать быстродействующий регулятор, который своевременно реагирует на изменение заданной функции на входе. Наиболее разумным интервалом оптимизации с точки зрения практики будет $(\Delta t, 2\Delta t)$, где Δt - величина шага равномерной выборки переходной функции объекта.

Однако, пытаясь достичь быстродействия, мы теряем устойчивость регулируемого процесса. Особенно это касается задач, когда выборка измерена со значительными помехами. Оптимальное значение C_s^{III} в этом случае будет таково, что случайные помехи исходной выборки не будут «сглаживаться». Это может привести к значительным искажениям в оценке переходной функции регулятора. При наличии существенных случайных помех (3-5% абсолютной величины исходных выборочных значений) оценка переходной функции регулятора становится нестабильной. Так, например, минимальные значения параметра, расположенные левее $C_s^{III\text{opt}}$ на рисунках 3.14 и 3.15 приведут к неустойчивости процесса регулирования.

Так как регулятор, построенный на основе расходящейся из-за неустойчивости численного решения характеристики, практически непригоден в задачах управления реальными объектами, предлагается модифицировать алгоритм таким образом, чтобы по возможности снизилось влияние помех на процесс синтеза непараметрического регулятора. Для этого применяем повторное непараметрическое сглаживание выборки, используя в процедуре построения реализации переходной функции регулятора не сами выборочные значения, а значения выхода непараметрической модели ЛДС, построенной на основе исходной выборки. В этом случае процедура (3.32) принимает вид:

$$w(t) = \frac{\frac{C_s^{II}}{\Delta t} - \frac{C_s^{II}}{C_s^I} u(t) \sum_{i=1}^s x_s(t_i) H\left(\frac{-t_i}{C_s^I}\right) - \Delta\tau \sum_{k=0}^{\frac{t-\Delta\tau}{\Delta\tau}} \sum_{i=1}^s x_s(t_i) H'\left(\frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s^{II}}\right) w(t - k\Delta\tau)}{\frac{C_s^{II}}{C_s^I} \Delta\tau \sum_{i=1}^s x_s(t_i) H'\left(\frac{-t_i}{C_s^I}\right)}, \quad (3.36)$$

где $w(0) = 0$.

На рисунке 3.16 представлено взаимное расположение полученных в результате расчетов точек минимума критерия (3.34) [3].

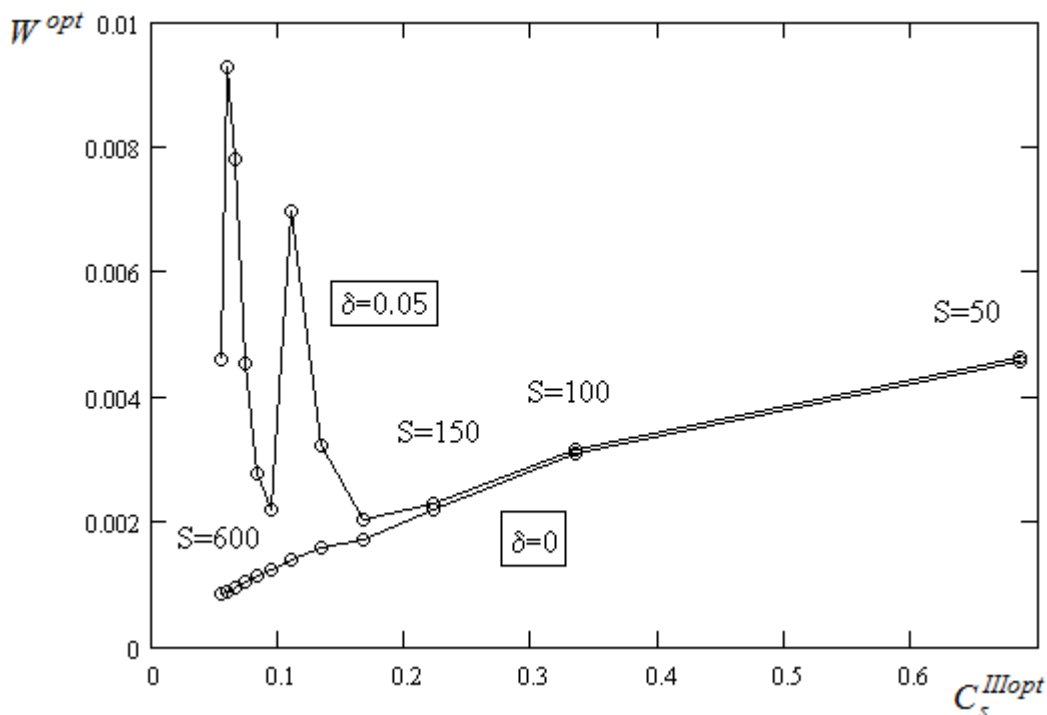


Рисунок 3.16. Взаимное расположение точек минимума критериальной функции (3.34)

Точками на плоскости изображены значения параметра размытости и критериальной функции при различных величинах объема выборки без помех и со случайными помехами 5%, наложенными на выход объекта. На основе изображенного графика можно сделать выводы о характере асимптотического поведения непараметрического регулятора.

Построение непараметрического регулятора для процессов, длительность которых превышает время регулирования. Одной из проблем, связанных с построением непараметрических моделей и регуляторов

ЛДС, является проблема искажения оценок за пределами выборки. Появляется необходимость модифицировать алгоритмы таким образом, чтобы они позволяли моделям и регуляторам функционировать за границей временных рамок, заданных выборкой переходного процесса системы.

Рассмотрим непараметрическую оценку импульсной переходной функции, используемую в задачах непараметрического моделирования и управления ЛДС:

$$g_s(t, C_s^{II}) = \frac{T}{sC_s^{II}} \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{t-t_i}{C_s^{II}} \right). \quad (3.37)$$

Особенность оценки $g_s(t, C_s^{II})$ такова, что она может быть разбита во временном диапазоне на три характерных интервала:

$$\begin{cases} g_s(t, C_s^{II}) \approx g(t), & t < t_s - C_s^{II}, \\ g_s(t, C_s^{II}) \neq g(t), & t_s - C_s^{II} \leq t \leq t_s + C_s^{II}, \\ g_s(t, C_s^{II}) = 0, & t > t_s + C_s^{II}. \end{cases} \quad (3.38)$$

где t_s - правая временная граница выборки, т.е. момент времени, соответствующий последнему элементу выборки. На рисунке 3.17 показана правая граница оценки $g_s(t, C_s^{II})$.

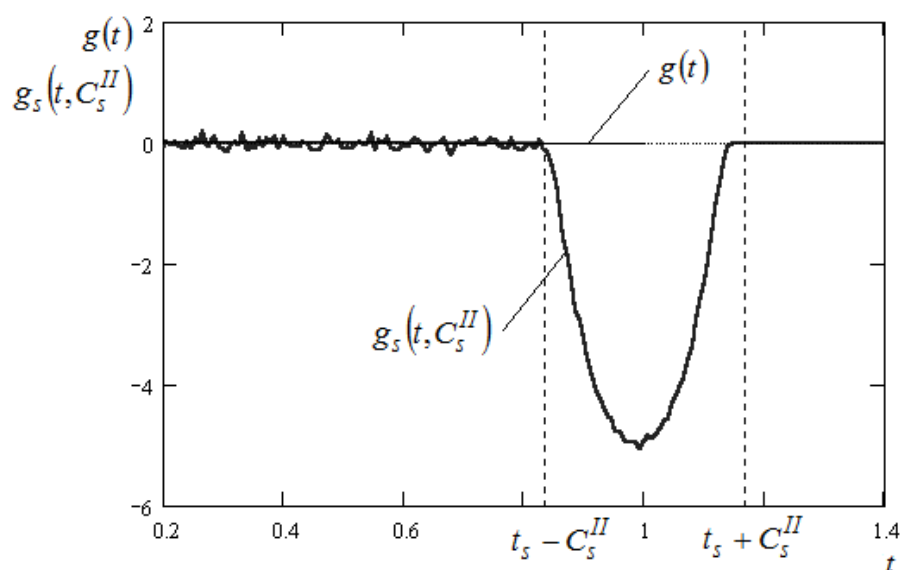


Рисунок 3.17. Искажения правой границы непараметрической оценки импульсной переходной функции ЛДС

Было предложено модифицировать алгоритм оценивания импульсной переходной функции системы таким образом, чтобы по возможности исключить искаженную область [3]. Вместо оценки $g_s(t, C_s^H)$ используем следующую модифицированную оценку:

$$F_s(t, C_s^H) = \begin{cases} \frac{T}{sC_s^H} \sum_{i=1}^s h_i H' \left(\frac{t-t_i}{C_s^H} \right), & t < t_s - C_s^H, \\ 0, & t \geq t_s - C_s^H. \end{cases} \quad (3.39)$$

Оценивание выхода ЛДС проводится с помощью процедуры:

$$x_s(t, u(t), C_s^I, C_s^H) = h_s(0, C_s^I) \mu(t) + \int_0^t F_s(\tau, C_s^H) \mu(t-\tau) d\tau. \quad (3.40)$$

Оценка вида (2.40) дает хорошие результаты в задачах идентификации ЛДС и синтеза непараметрического регулятора в случае незначительных помех исходной выборки. Если же выборка получена с существенными помехами, составляющими 3-5% от абсолютного значения измеряемой величины, происходит искажение выхода модели из-за появления ошибки, вызванной «скачком» $F_s(t, C_s^H)$ в момент $t = t_s - C_s^H$. В этом случае предлагается внести следующую поправку в вычисление оценки выхода ЛДС:

$$x_s^{imp}(t) = x_s(t) + \mu(t), \quad (3.41)$$

где $\mu(t)$ - поправочная добавка:

$$\mu(t) = \begin{cases} K \cdot \left[1 - \int_{t_0}^{t_s} F_s(\tau, C_s^H) d\tau \right] \cdot u(t - t_s + C_s^H), & t \geq t_s - C_s^H, \\ 0, & t < t_s - C_s^H. \end{cases} \quad (3.42)$$

K - передаточный коэффициент ЛДС, который может быть найден как отношение выходного сигнала к входному воздействию в установившемся режиме.

Управление объектом с запаздыванием. Пусть объект представляет собой ЛДС с запаздыванием, то есть оператор системы представлен выражением:

$$x(t) = Au(t - \tau_0), \quad (3.43)$$

где τ_0 - величина запаздывания. В этом случае для того, чтобы в момент времени t на входе объекта получить $x(t) = x^*(t)$, необходимо подать на вход соответствующее управление в момент времени $t - \tau_0$. При построении непараметрического регулятора следует учесть то обстоятельство, что обратным оператором по отношению к оператору запаздывания является *оператор упреждения*. Таким образом, непараметрический регулятор ЛДС с запаздыванием будет определяться выражением:

$$u_s(t) = u_s^*(t + \tau_0). \quad (3.44)$$

Вычислительная алгоритмическая процедура построения регулятора. В качестве «объекта» моделирования было взято линейное разностное уравнение 3-го порядка [36]:

$$x_i = \alpha u_i + \beta x_{i-1} + \chi x_{i-2} + \delta x_{i-3} = \frac{K}{A+B+C+D} u_i + \frac{3A+2B+C}{A+B+C+D} x_{i-1} - \frac{3A+B}{A+B+C+D} x_{i-2} + \frac{A}{A+B+C+D} x_{i-3} - \frac{E}{A+B+C+D}, \quad (3.45)$$

где $u_i, x_i, i = 1, 2, \dots, s$ - значения входной и выходной переменных объекта, коэффициенты в уравнении выбирались из условия устойчивости и принимали следующие значения: $K = 6.24, A = \frac{0.15}{\Delta t^3}, B = \frac{1.965}{\Delta t^2}, C = \frac{2.7}{\Delta t}, D = 6.24, E = 0$;

Δt выбирался различным. Время регулирования найдено экспериментально, начальные условия взяты нулевыми.

С использованием разностной модели (3.45) получена выборка $\{t_i, h_i\}, i = 1, 2, \dots, s$, которая представляет собой измерения реакции «объекта» на единичное входное воздействие, в предыдущих обозначениях $x_i = h_i, u_i = 1(t_i)$. Построение модели ЛДС проводилось при помощи следующей процедуры [3]:

$$\hat{x}(t_j) = \left[\sum_{k=0}^{t_j/\Delta\tau} \hat{F}(k\Delta\tau, C_s^{Hopt}) \cdot u(t_j - k\Delta\tau) \Delta\tau \right] + \hat{\mu}(t_j), \quad (3.46)$$

где $u(t)$ - произвольное входное воздействие, заданное в дискретные моменты времени t_j , $j=1,2,\dots$, $\Delta\tau$ - величина шага численного интегрирования.

Интегрирование проводилось с использованием метода прямоугольников.

Модифицированная оценка импульсной переходной функции системы имеет следующий вид [3]:

$$\hat{F}(k\Delta\tau, C_s^{opt}) = \begin{cases} \Delta t \sum_{i=1}^s x_i H' \left(\frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s^{opt}} \right), & k\Delta\tau < t_s - C_s^{opt}, \\ 0, & k\Delta\tau \geq t_s - C_s^{opt}. \end{cases} \quad (3.47)$$

где s - объем выборки, C_s^{opt} - оптимальное значение параметра размытости,

$H'(\cdot)$ - производная по времени функции Соболева. Поправочная добавка $\hat{\mu}(t_j)$

:

$$\hat{\mu}(t_j) = \begin{cases} K \left[1 - \sum_{k=0}^{t_s/\Delta\tau} \hat{F}(k\Delta\tau, C_s^{opt}) \Delta\tau \right] u(t_j - t_s + C_s^{opt}), & t_j \geq t_s - C_s^{opt}, \\ 0, & t_j < t_s - C_s^{opt}, \end{cases} \quad (3.48)$$

где K - передаточный коэффициент ЛДС. Критерий оптимизации по параметру размытости C_s^{II} принял следующую форму:

$$\hat{J}_{II} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left[\left(\sum_{k=0}^{t_i/\Delta\tau} g_s(k\Delta\tau, C_s^{II}) \Delta\tau \right) - h_i \right]^2 \rightarrow \min_{C_s^{II}}, \quad (3.49)$$

где $g_s(k\Delta\tau, C_s^{II})$ - непараметрическая оценка импульсной переходной функции системы [19]:

$$g_s(k\Delta\tau, C_s^{II}) = \Delta t \sum_{i=1}^s x_i H' \left(\frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s^{II}} \right). \quad (3.50)$$

Построение алгоритма численного оценивания непараметрического регулятора приведено ниже. Реализация переходной функции процесса в направлении «выход-вход» (3.36) с учетом алгоритмических особенностей решения задачи вычислялась следующим образом:

$$w_j = \frac{1 - \Delta t \sum_{k=1}^{j-1} \left[\sum_{i=1}^s \hat{h}_i \cdot H' \left(\frac{t_k - t_i}{C_s^{IIopt}} \right) \right] w_{j-k}}{\Delta t \sum_{i=1}^s \hat{h}_i \cdot H' \left(\frac{t_1 - t_i}{C_s^{IIopt}} \right)}, \quad j = 2, 3, \dots, s, \quad w_1 = 0. \quad (3.51)$$

В проведенной серии экспериментов объем выборки реализации переходной функции регулятора был принят равным исходному объему выборки s . Алгоритм оценивания выхода непараметрического регулятора принял вид:

$$\hat{u}(t_j) = \left[\sum_{k=0}^{t_j / \Delta \tau} \hat{V}(k\Delta \tau, C_s^{IIIopt}) \cdot x^*(t_j - k\Delta \tau) \Delta \tau \right] + \hat{\mu}^{inv}(t_j), \quad (3.52)$$

где $x^*(t_j)$ - заданное желаемое значение выхода управляемой ЛДС.

Модифицированная оценка импульсной переходной функции непараметрического регулятора имеет вид:

$$\hat{V}(k\Delta \tau, C_s^{IIIopt}) = \begin{cases} \Delta t \sum_{i=1}^s w_i H' \left(\frac{k\Delta \tau - t_i}{C_s^{IIIopt}} \right), & k\Delta \tau < t_s - C_s^{IIIopt}, \\ 0, & k\Delta \tau \geq t_s - C_s^{IIIopt}. \end{cases} \quad (3.53)$$

Поправочная добавка $\hat{\mu}^{inv}(t_j)$:

$$\hat{\mu}^{inv}(t_j) = \begin{cases} K \left[1 - \sum_{k=0}^{t_s / \Delta \tau} \hat{V}(k\Delta \tau) \Delta \tau \right] x^*(t_j - t_s + C_s^{IIIopt}), & t_j \geq t_s - C_s^{IIIopt}, \\ 0, & t_j < t_s - C_s^{IIIopt}. \end{cases} \quad (3.54)$$

Критерий оптимизации по параметру размытости C_s^{IIIopt} принял следующий вид:

$$W = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left[1 - \sum_{k=0}^{t_i / \Delta \tau} g_s(k\Delta \tau, C_s^{IIopt}) \left[\sum_{k_1=0}^{t_i / \Delta \tau} v_s(t_i - k_1\Delta \tau, C_s^{III}) \Delta \tau \right] \Delta \tau \right]^2 \rightarrow \min_{C_s^{III}}, \quad (3.55)$$

где $v_s(t, C_s^{III})$ - непараметрическая оценка импульсной переходной функции регулятора:

$$v_s(t, C_s^{III}) = \Delta t \sum_{i=1}^s w_i H' \left(\frac{t - t_i}{C_s^{III}} \right). \quad (3.56)$$

Иллюстрации экспериментов с непараметрическим алгоритмом управления. Численные эксперименты с алгоритмом управления были проделаны с применением специально созданного программного комплекса [32], а позже в пакете математических и инженерных расчетов Matlab [8]. Для численных экспериментов с непараметрическим регулятором в качестве задающих сигналов взяты следующие функции:

1. Ступенчатая функция:

$$x_1^*(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 2, & 0 \leq t < 10, \\ 0, & 10 \leq t < 20, \\ -1, & 20 \leq t < 30, \\ 1, & 30 \leq t. \end{cases} \quad (3.57)$$

2. Сложное непрерывное воздействие:

$$x_2^*(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{20}\right), & 0 \leq t < 10, \\ 2 - 0.1 \cdot t, & 10 \leq t < 20, \\ (0.1414 \cdot (t - 20))^2, & 20 \leq t < 30, \\ 0, & 30 \leq t. \end{cases} \quad (3.58)$$

На рисунках 3.18 - 3.23 [36] представлены иллюстрации экспериментов по построению непараметрического регулятора.

Рисунок 3.18 [36] изображает оценки переходных функций процессов «выход-вход». Нетрудно заметить, что от привычных, классических переходных характеристик они отличаются тем, что имеют характерный «всплеск» в начальный момент времени. Величина этого «всплеска» возрастает с увеличением объема выборки.

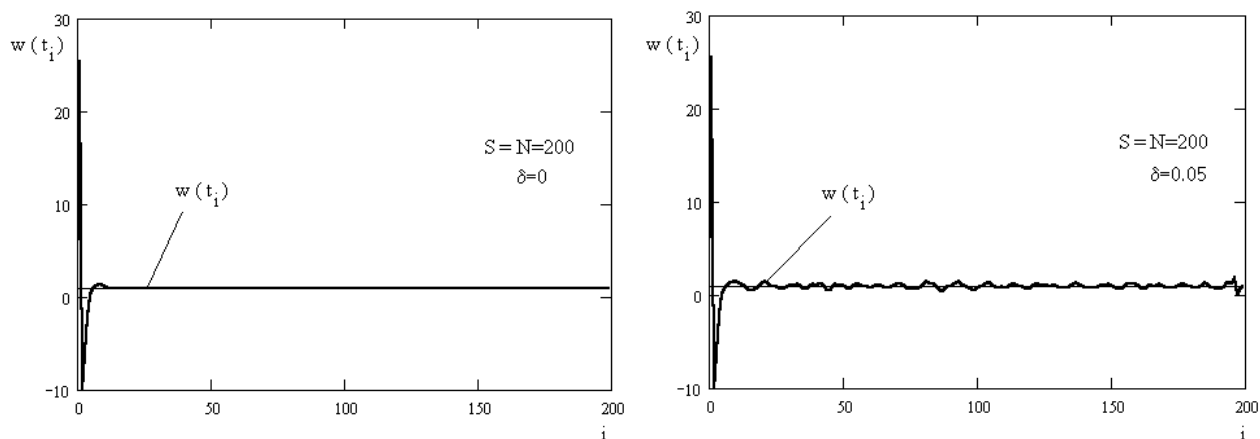


Рисунок 3.18. Оценка переходной функции непараметрического регулятора, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта (б)

Рисунок 3.19 [36] иллюстрируют отклики системы на переходную функцию регулятора на входе. Они демонстрируют быстродействие непараметрического регулятора и точность, с которой он позволяет получить ступенчатую функцию на выходе системы.

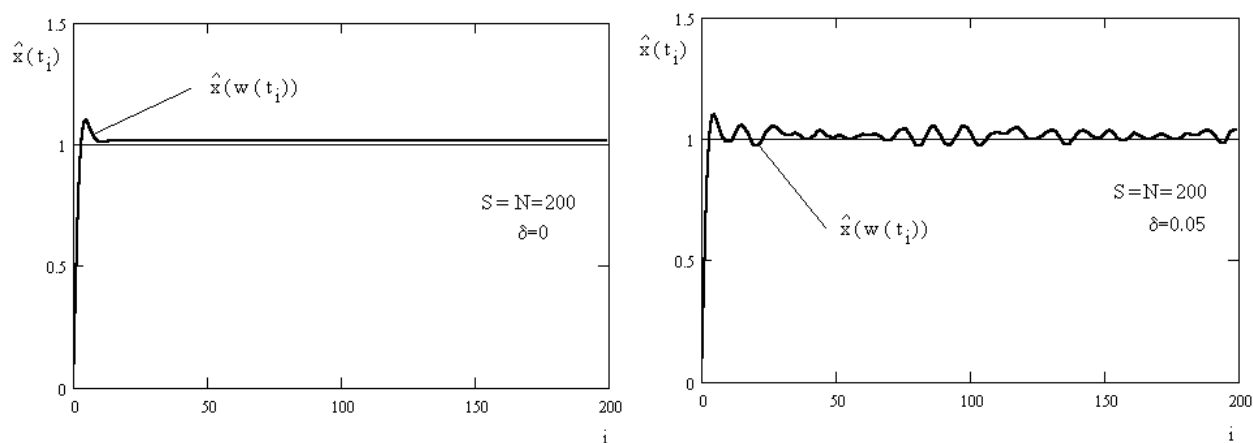


Рисунок 3.19. Реакция ЛДС на переходную функцию регулятора на входе, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта (б)

На рисунке 3.20 [36] показаны управляющие воздействия, сгенерированные непараметрическим регулятором для случая, когда задание представляло собой ступенчатую функцию (3.57).

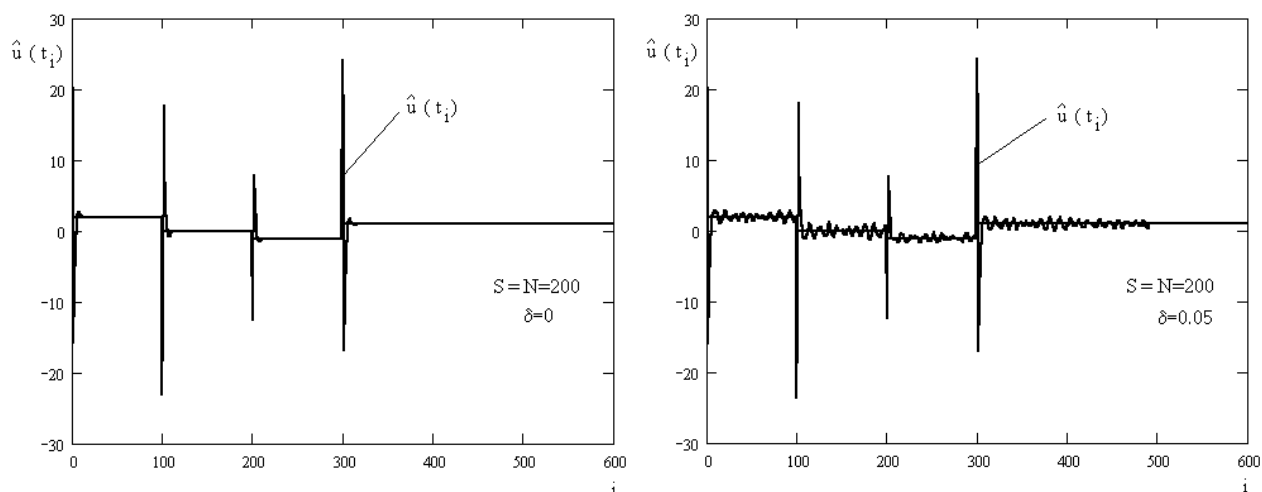


Рисунок 3.20. Непараметрическая оценка управляющего воздействия, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта (б)

Аналогично для задающего воздействия (3.58) управляющие воздействия показаны на рисунке 3.21 [36]. На рисунке изображено управляющее воздействие в случае, когда на его величину не наложены ограничения. Проблему синтеза непараметрического регулятора для объекта с ограничениями на входную величину мы рассмотрим отдельно.

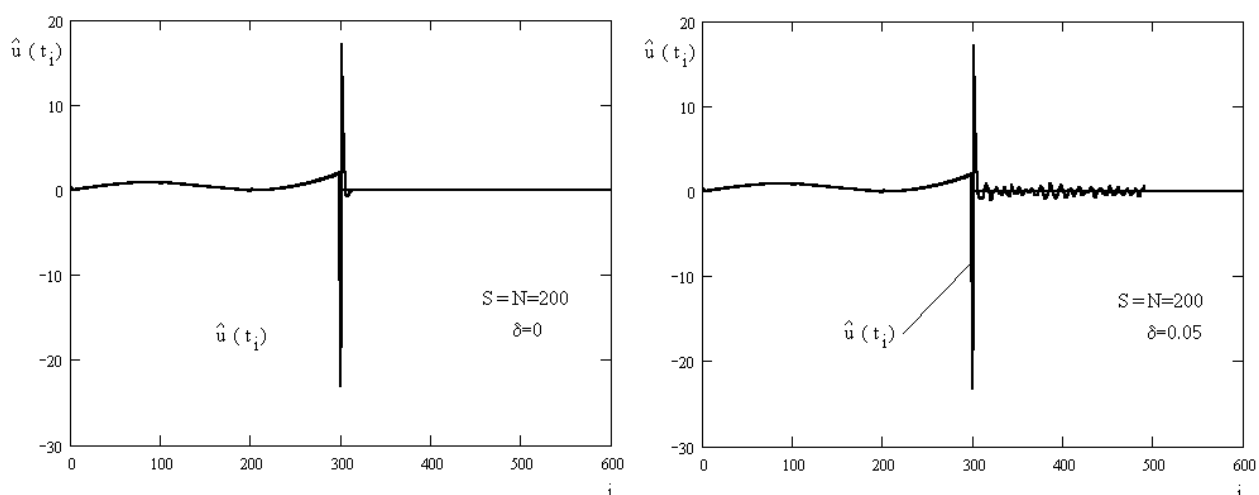


Рисунок 3.21. Непараметрическая оценка управляющего воздействия, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта (б)

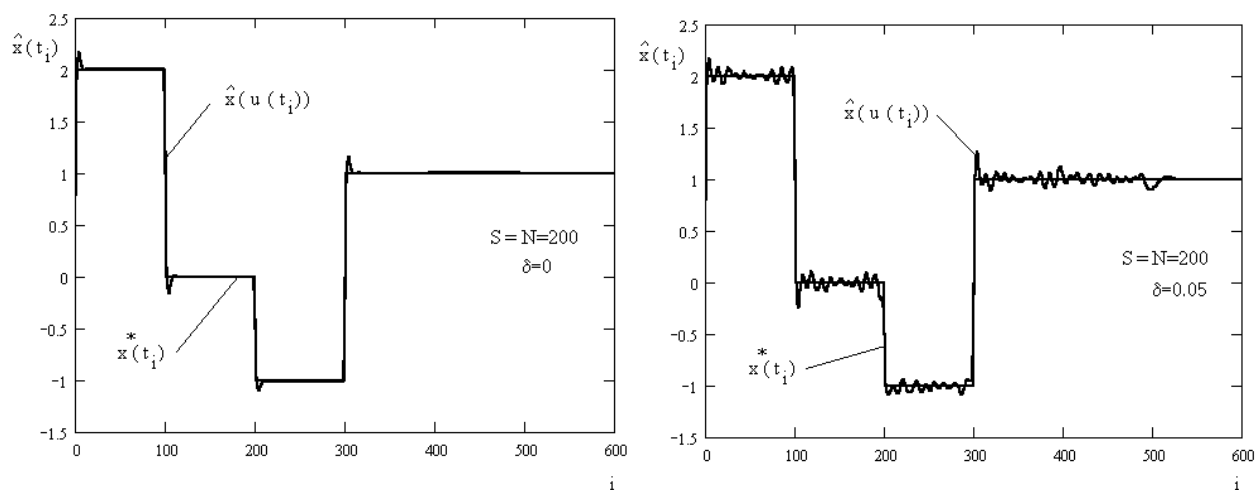


Рисунок 3.22. Выход управляемого объекта, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта (б)

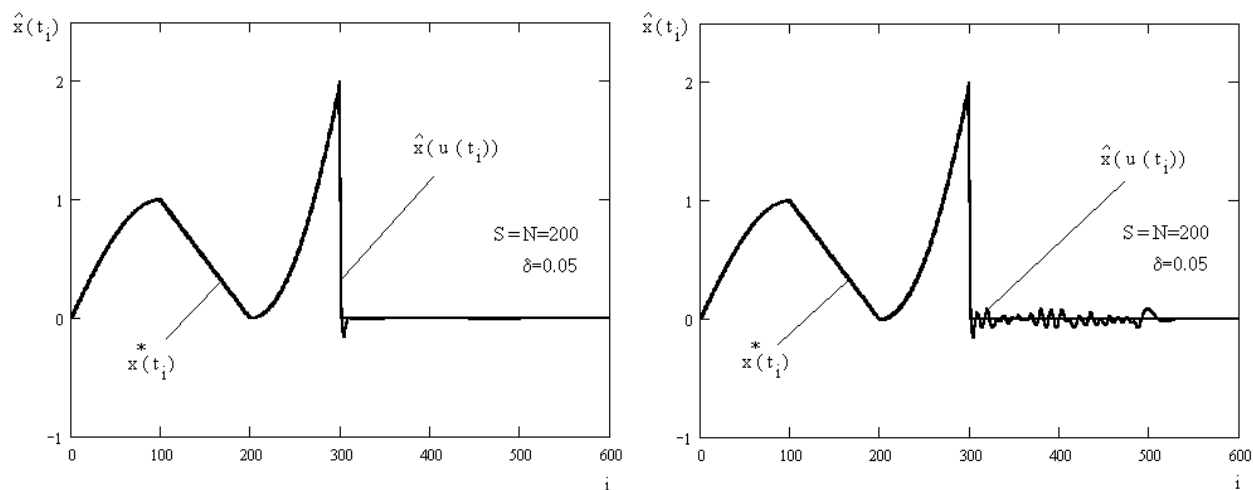


Рисунок 3.23. Выход управляемого объекта, исходная выборка без помех (а), со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта (б)

На рисунках 3.22 и 3.23 [36] изображены реакции объекта, управляемого непараметрическим регулятором. В данном случае были осуществлены модификации базового алгоритма для работы за рамками временных ограничений, заданных рабочей выборкой, а также, повторного непараметрического оценивания для сглаживания искажений, вызванных случайными помехами в исходной выборке. В результате экспериментов подтверждена работоспособность алгоритма построения непараметрического регулятора и его модификаций.

Непараметрическое управление при ограничениях, наложенных на

вход системы. С практической точки зрения важно решение задачи управления объектом в случае, когда величина управляющего воздействия на объект ограничена. Действительно, входные параметры объекта любой природы подвержены естественным, технологическим и другим ограничениям. Непараметрический регулятор в этом случае должен удовлетворять условиям физической реализуемости процесса управления.

Пусть значения входного процесса выбираются из ограниченного интервала $u(t) \in [u_{\min}, u_{\max}]$. Устройство управления формирует управляющее воздействие, которое зависит от некоторых свойств желаемого выхода системы $x^*(t)$. Очевидно, например, что в случае, когда $x^*(t)$ имеет разрывы, а также, если на определенных участках её приращение велико относительно приращения аргумента, управляющее устройство генерирует сигнал с высокой амплитудой на входе системы.

Предлагается сделать процесс управления физически реализуемым в результате корректировки функции желаемого выхода системы $x^*(t)$ (функции задания). Таким образом, реализуется один из принципов теории управления, когда целевая функция подвергается подстройке, для того чтобы повысить *управляемость* объекта, то есть вероятность того, что случайно выбранная ситуация достижима в процессе управления [167]. В данном случае необходимость корректировки цели обусловлена недостатком ресурсов для её достижения, а именно ограничениями, наложенными на вход системы.

Один из возможных вариантов корректировки функции задания - потребовать, чтобы $x^*(t)$ удовлетворяла условию Липшица:

$$|x^*(t) - x^*(\tau)| \leq M \cdot |t - \tau|, \quad (3.59)$$

где t и τ - произвольные значения аргумента. Нижняя граница постоянных M называется *константой Липшица* [87]. Модификация алгоритма синтеза непараметрического регулятора будет заключаться в процедуре выбора этой константы. В задаче синтеза непараметрического регулятора процессы $u(t)$ и

$x^*(t)$ дискретные по времени. Кроме того, представляется ненужным выбор единственной константы M на всём временном интервале процесса управления, так как в зависимости от степени близости границы управляющего воздействия относительно текущего состояния объекта эта величина может быть различной. Вследствие этого целесообразно использовать подход к корректировке $x^*(t)$ на каждом шаге процесса управления в зависимости от состояния объекта в данный момент [3], [20]. Рисунок 3.24 поясняет сущность приведенного подхода.

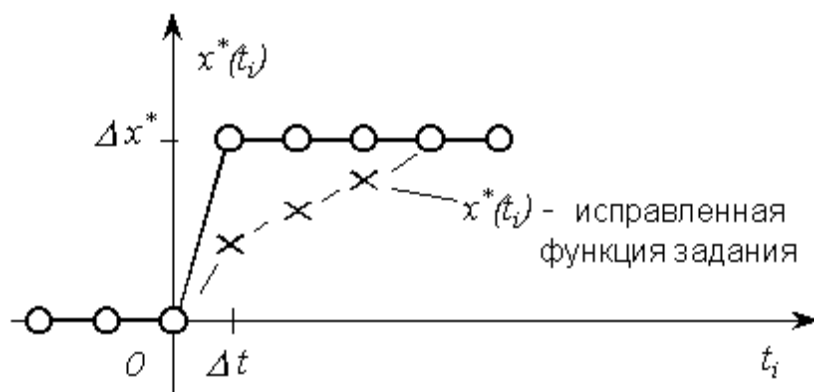


Рисунок 3.24. Корректировка дискретных значений задающего воздействия $x^*(t_i)$, в том случае, когда приращение задания Δx^* физически нереализуемо

Алгоритм и результаты экспериментов даны для систем с передаточным коэффициентом $k = 1$ для наглядности результатов. В этом случае управляющее воздействие и выход объекта возможно визуально сопоставить друг с другом. Сконструированный алгоритм адаптивной коррекции функции задания непараметрического регулятора $x^*(t)$ представлен ниже.

Шаг I. Осуществляем расчет управляющего воздействия на текущем такте с помощью алгоритма функционирования непараметрического регулятора. Если управление на данном такте не удовлетворяет ограничениям, переходим к шагу II.

Шаг II. Определяем расстояния между значением выхода системы на

предыдущем такте $x^*(t_{i-1})$ и ограничениями управляющего воздействия u_{\min} , u_{\max} . Находим минимальную из полученных величин.

$$\lambda(t_i) = \min \{u_{\max} - x^*(t_{i-1}), x^*(t_{i-1}) - u_{\min}\}, \quad i = \overline{1, N-1}. \quad (3.60)$$

Шаг III. Корректируем желаемый выход системы на текущем такте $x^*(t_i)$ относительно предыдущего $x^*(t_{i-1})$ на величину, равную максимальному возможному отклонению, исходя из условий реализуемости по входу, принимая во внимание расстояние до ближайшего ограничения, найденное на шаге II.

$$x^*(t_i) = \begin{cases} x^*(t_{i-1}) + \lambda(t_i) / w_1, & x^*(t_i) > x^*(t_{i-1}), \\ x^*(t_{i-1}) - \lambda(t_i) / w_1, & x^*(t_i) \leq x^*(t_{i-1}), \end{cases} \quad i = \overline{1, N-1}, \quad (3.61)$$

$$w_1 = \frac{1}{\Delta t \cdot h'_s(0)}. \quad (3.62)$$

Здесь w_1 - наибольший по абсолютному значению элемент реализации переходной характеристики непараметрического регулятора. Он является ключевым для отыскания максимально возможного отклонения желаемого выхода. Эксперименты показали, что первый ненулевой элемент выборки и будет максимальным. Это обусловлено процедурой выбора параметра размытости для непараметрического регулятора.

Фактически, приведенный алгоритм реализует оптимальное управление для каждого такта в случае, когда базовый непараметрический алгоритм не может быть применен из-за того, что синтезируемое управление не удовлетворяет ограничениям. Оптимальность следует понимать применительно к существующей постановке задачи. На следующих рисунках показаны результаты моделирования регулятора, когда на вход объекта наложены ограничения [3], [20].

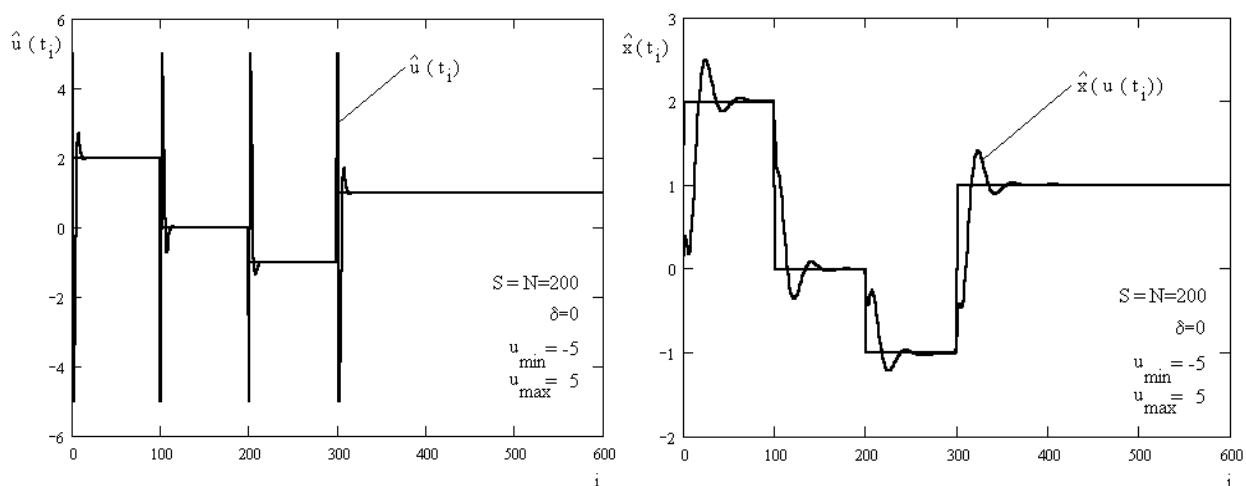


Рисунок 3.25. Управляющее воздействие (а) и реакция объекта (б) при использовании неадаптированного алгоритма регулирования. Выборка без помех, $u_{min} = -5$, $u_{max} = 5$

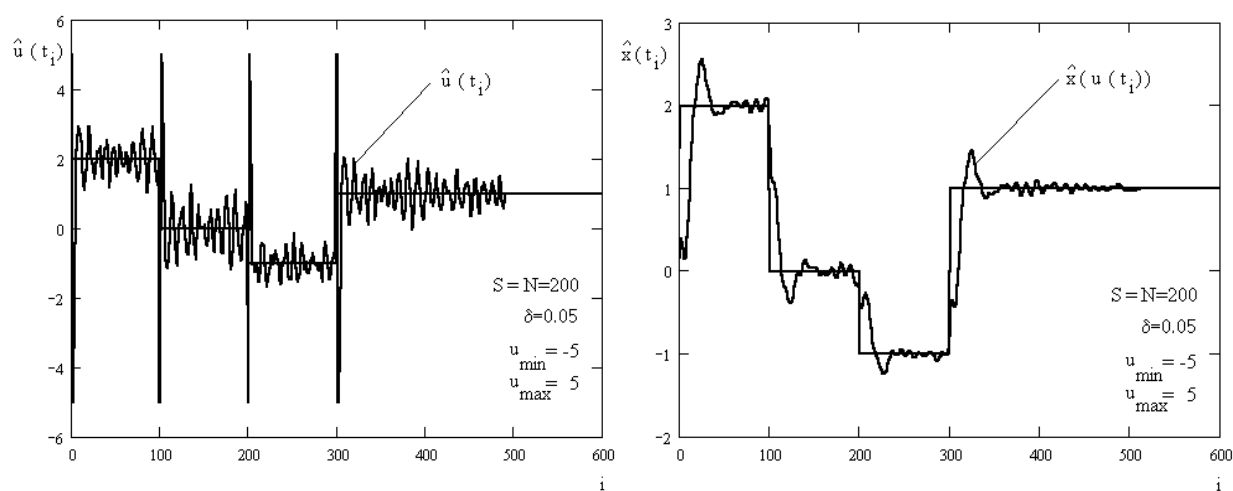


Рисунок 3.26. Управляющее воздействие (а) и реакция объекта (б) при использовании неадаптированного алгоритма регулирования. Выборка со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта,

$$u_{min} = -5, u_{max} = 5$$

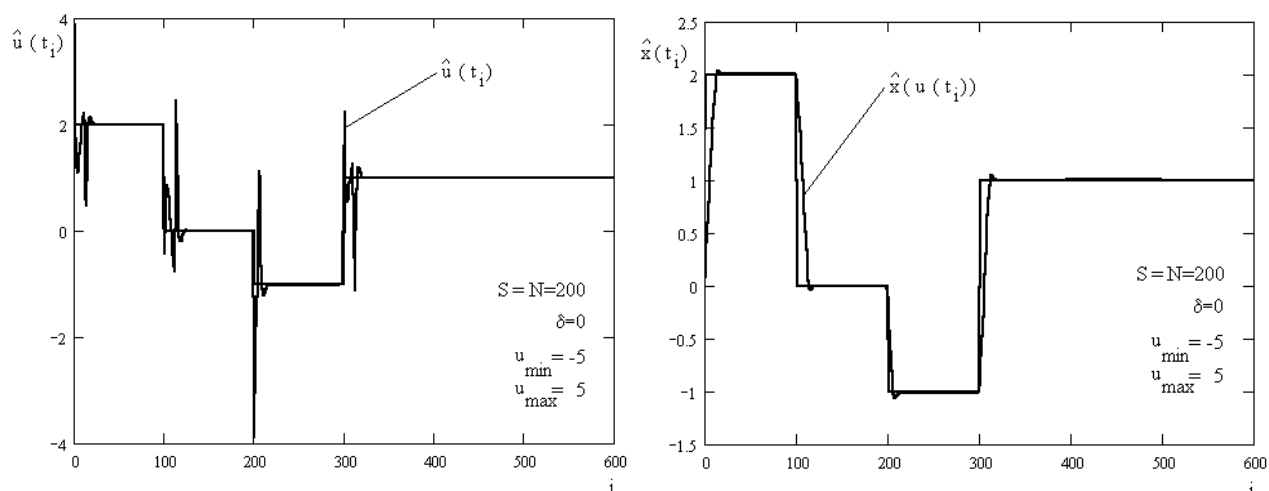


Рисунок 3.27. Управляющее воздействие (а) и реакция объекта (б) при использовании модифицированного алгоритма регулирования. Выборка без помех, $u_{min} = -5$, $u_{max} = 5$

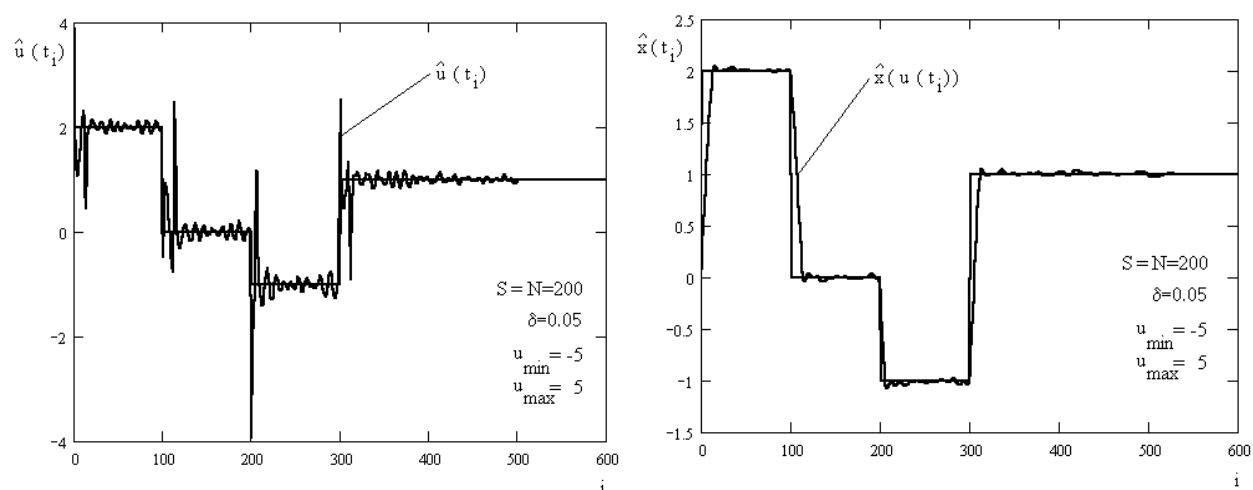


Рисунок 3.28. Управляющее воздействие (а) и реакция объекта (б) при использовании модифицированного алгоритма регулирования. Выборка со случайной помехой 5% от абсолютного значения выхода объекта,

$$u_{min} = -5, u_{max} = 5$$

Особый случай представляет собой проблема регулирования в непосредственной близости от границ, наложенных на величину управляющего воздействия. Так на рисунке 3.29 представлен результат эксперимента, когда верхняя граница управляющего воздействия и исходная функция задания принимали одинаковое значение (для систем с единичным передаточным коэффициентом).

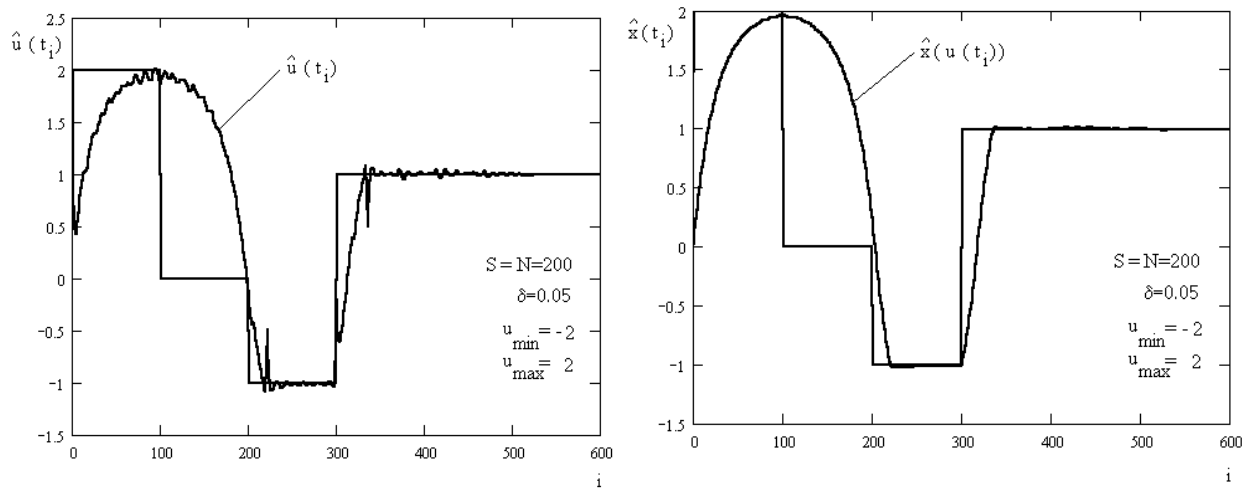


Рисунок 3.29. Управляющее воздействие (а) и реакция объекта (б) при использовании модифицированного алгоритма регулирования. Выборка со случайной помехой 5%, $u_{min} = -2$, $u_{max} = 2$

Как можно заметить, регулятор осуществляет плавное выведение системы в заданное состояние. Процесс удаления системы от заданной границы по управлению также происходит плавно. Такое поведение регулятора наглядно иллюстрирует принцип работы модифицированного алгоритма управления.

3.4. Алгоритм линеаризации моделей динамических систем с использованием непараметрического регулятора. Реализация алгоритма для прогноза температуры нагревательных систем

Проверка гипотезы о линейности динамической системы, о которой ранее шла речь в настоящей главе, имеет главную цель – определить применимость линейной модели для описания динамического процесса, и, дополнительно к этому, дать оценку, возможно несколько грубую, о предполагаемом качестве моделирования. Возникает естественный вопрос о том, что необходимо предпринять в случае, когда модельное описание объекта или процесса в терминах линейной модели непродуктивно или же вовсе невозможно.

При этом возникает задача расширения класса процессов, для которых применимы непараметрические методы идентификации, на нелинейные динамические процессы. Этим вопросам посвящено множество работ, например [131], [135], имеющих как обзорный характер, так и направленных на выработку подходящего методологического и алгоритмического решения этой задачи.

Среди способов описания нелинейных объектов и процессов в случае недостатка информации об их параметрической структуре можно выделить следующие:

1. *Описание объекта моделью заведомо невысокого порядка.* Этот способ активно используется при построении систем автоматического регулирования. Промышленные регуляторы, как правило, осуществляют ПИД-закон регулирования, который предназначен для управления объектами не выше второго порядка с запаздыванием.

2. *Представление модели последовательным включением линейных и нелинейных систем.* Такой подход реализован, например, в схемах Винера и Гаммерштейна [283], [213]. Применение этого способа требует разработки соответствующей методологии идентификации.

3. *Синтез модели в виде функциональных рядов Вольтерра* [282]. Способ отличается избыточной вычислительной сложностью, в том числе, требует избыточное количество экспериментальных данных.

4. *Применение авторегрессионных моделей.* Непараметрические авторегрессионные модели показали свою эффективность, в т.ч. и при решении задач управления нелинейным объектом [228].

5. *Линеаризация модели.* Подход нуждается во всестороннем исследовании. Как и другие способы имеет как достоинства и недостатки.

В настоящем разделе диссертации более подробно рассматривается именно метод линеаризации динамической модели объекта. В этом случае нелинейная модель объекта представлена в виде комбинации линейных моделей, переход между которыми осуществляется по определенным правилам.

Прослеживание состояния линеаризованной модели динамического процесса тесно связано с задачей учета граничных условий при переходе между локальными линейными моделями.

Здесь требуется пояснение используемых терминов. Понятия «начальные условия» и «граничные условия» в контексте работы имеют одинаковый смысл. Для итоговой нелинейной модели состояния в момент перехода между линейными её компонентами есть промежуточные, граничные. Для локальных линейных моделей эти состояния соответствуют начальным условиям в общепринятом смысле.

Далее предлагаются способ и алгоритмы сопряжения линейных непараметрических моделей при решении задачи нелинейной идентификации методом линеаризации в случае, когда информация о начальных (граничных) условиях в явной форме недоступна. Иллюстрация работы предложенного алгоритма представлена на примере идентификации термических процессов [25].

Пусть объект идентификации относится к классу нелинейных динамических. Объект имеет один вход и один выход. Входной и выходной процессы обозначим соответственно $u(t)$ и $x(t)$. Доступны выборки «вход-выход» объекта для областей, в которых поведение объекта близко к линейному. Такое разбиение на области линейного описания можно производить относительно значений входного или выходного процессов. Примеры подобного разбиения показаны на рисунке 3.30.

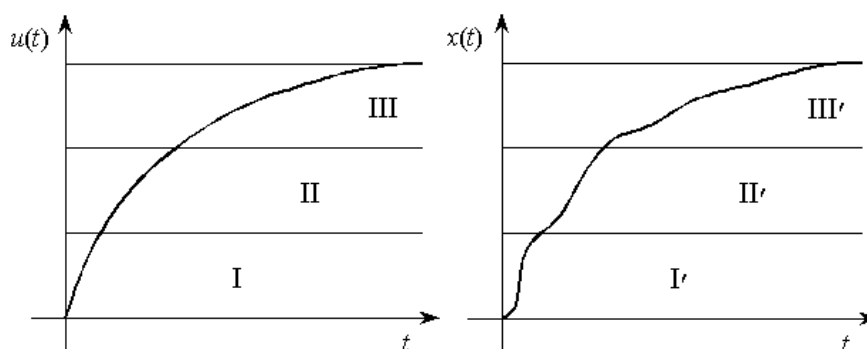


Рисунок 3.30. Разбиение диапазона входного воздействия (а) или выходного процесса (б) на области, соответствующие линейному описанию

В первом случае диапазон значений $u(t)$ разбивается на области I, II и III, внутри которых поведение объекта с достаточной точностью может быть описано линейной моделью. Во втором случае такое разбиение на области линейного описания I', II' и III' проводится на множестве значений $x(t)$.

В общем случае зоны линейного описания будут представлять собой подмножества пространства состояний динамического объекта. Проблема выделения этих подмножеств сама по себе является очень сложной и будет требовать многочисленных экспериментов над системой с проверкой линейности её откликов, а базироваться на знаниях экспертов.

На практике проведены исследования нагревательных систем, для которых оправдано разбиение на линейные области относительно входного воздействия. Подобные системы служат для выполнения ряда технологических операций в процессе производства полупроводниковых материалов в установках быстрого нагрева [27], [12], [30], [225], в металлургии, в энергетике, в системах транспортировки и переработки нефти [208], [223]. Входное воздействие в данном случае – это напряжение, подаваемое на нагревательный элемент. Выходной процесс – температура нагреваемого тела, измеренная контактным, либо бесконтактным (пирометрическим) способом.

В качестве исходной информации используются отклики системы на ступенчатые воздействия различной амплитуды. При анализе этих сигналов в некоторых случаях на практике была замечена следующая закономерность: отклики на ступенчатые сигналы, у которых конечная величина одинаковая, а начальные различались, в достаточном приближении были линейно-зависимыми процессами. Коэффициент линейной зависимости равнялся отношению амплитуд ступенчатых воздействий. Такое поведение указывает на то, что систему можно отнести к первому типу, т.е. разбиение на линейные области целесообразно проводить относительно значений входного процесса.

Следующий за разбиением на линейные области этап идентификации – построение локальных линейных моделей для каждой области. В непараметрической постановке эта задача решается путем оценивания импульсных переходных функций и подстановки оценок в интеграл-свертку (2.25).

Оценку импульсной переходной функции можно получить, применяя модели (2.43), подавая на вход системы тестовый сигнал в виде единичной ступенчатой функции, как это было описано в первом разделе диссертации, либо дискретный аналог дельта-функции Дирака, впоследствии измеряя отклик системы и применяя к нему сглаживание с использованием непараметрических оценок типа H -аппроксимаций или других сглаживающих процедур.

Упомянутые выше методы, так или иначе, связаны с проведением экспериментов над динамической системой. Также существуют способы идентификации ИПФ в режиме нормальной эксплуатации объекта. Это корреляционная идентификация с применением уравнения Винера-Хопфа [283], [255] или численное решение интегрального уравнения Дюамеля относительно ИПФ с предварительным сглаживанием входного и выходного процессов [184].

Необходимо отметить, что разбиение на области линейного описания и оценивание ИПФ для полученных областей могут проводиться неоднократно в ходе проведения экспериментов над системой и анализа полученных результатов, либо наблюдения за её поведением в режиме нормальной эксплуатации. В итоге получаем серию импульсных переходных функций, соответствующих локальным линейным моделям, например в случае, приведённом на рисунке 3.30: $g_I(t)$, $g_{II}(t)$ и $g_{III}(t)$.

На следующем этапе требуется сопряжение локальных линейных моделей и синтез комплексной нелинейной модели объекта. Эта задача неразрывно связана с учетом начальных (граничных) условий при переходе между локальными линейными моделями. В самом деле, для однозначного отыскания выходного процесса кроме уравнения, описывающего систему, необходимо

знать и её начальное состояние. В детерминистской непрерывной постановке эта задача эквивалентна задаче Коши, для которой при решении неоднородного линейного дифференциального уравнения p -го порядка с постоянными коэффициентами:

$$x^{(p)}(t) + a_1 x^{(p-1)}(t) + a_2 x^{(p-2)}(t) + \dots + a_{p-1} x'(t) + a_p x(t) = u(t) \quad (3.63)$$

необходимо задание начальных условий: $x(0), x'(0), \dots, x^{(p)}(0)$.

Будем полагать, что в уравнении нелинейной модели значения коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_p зависят от текущих значений $u(t)$ или $x(t)$. При решении задачи восстановления выходного процесса по известному входному воздействию методами численного интегрирования информация о значениях выходной величины и её производных: $x(t), x'(t), \dots, x^{(p)}(t)$ доступна на каждом шаге, а значит и в момент перехода между линейными моделями. Таким образом, задача идентификации в параметрической постановке подразумевает наличие информации не только о выходном процессе, но и его производных по времени до p -й включительно, и при решении задачи параметрической идентификации с использованием метода линеаризации такой проблемы не существует в принципе.

В непараметрической постановке задачи идентификации значения производных выходной величины напрямую недоступны, порядок уравнения n неизвестен, да и сама модель в виде интеграла Дюамеля предлагает решение только для случая, когда в начальный момент система находится в состоянии покоя, т.е. выходная величина и все её производные по времени равны нулю.

Проблема учета начальных условий возникает в различных теориях, использующих аппарат дифференциальных и разностных уравнений. Так в теории колебаний рассматривается введение начальных условий в дифференциальное уравнение с помощью импульсивных воздействий, изучается явление удара, сопряжение моделей колебательной системы с использованием так называемого «условия скачка» [40]. Однако модели классической теории колебаний имеют глубокую физическую интерпретацию

и, как правило, подразумевают знание порядка дифференциального или разностного уравнения. Предлагаемый способ введения начальных условий предназначен для использования с непараметрическими алгоритмами идентификации и используется в случае, когда априорная информация об объекте или процессе минимальна.

В основе предлагаемого алгоритма учета начальных условий лежит следующая идея. Начальные условия однозначно определяют состояние системы в определённый момент времени. Также состояние объекта обусловлено траекторией движения системы. Предлагается непосредственно перед переходом между линейными моделями дополнять входной процесс для очередной линейной модели таким образом, чтобы с его помощью воспроизвести траекторию выходного процесса на предыдущем участке. Тем самым гарантируется преемственность выходного сигнала, и исключаются ошибки при переходе между локальными моделями.

Рассмотрим алгоритм идентификации в простейшем случае. Пусть необходимо построить линеаризованную непараметрическую модель процесса с одним входом, одним выходом и нулевыми начальными условиями в случае, когда для идентификации достаточно две линейных модели, и переход от первой локальной модели ко второй происходит единственный раз в момент времени t_0 . Для дискретного варианта, т.е. при $t = 0, \Delta\tau, 2\Delta\tau, \dots$ выход модели [25]:

$$\hat{x}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{t/\Delta\tau} \hat{g}_I(i\Delta\tau) u^*(t-i\Delta\tau) \Delta\tau, & t < t_0, \\ \sum_{i=0}^{t/\Delta\tau} \hat{g}_{II}(i\Delta\tau) u^*(t-i\Delta\tau) \Delta\tau, & t \geq t_0, \end{cases} \quad (3.64)$$

где $\hat{g}_I(t)$ и $\hat{g}_{II}(t)$ - соответственно, непараметрические оценки ИПФ для первой и второй локальных моделей, $u^*(t)$ - исправленный входной процесс:

$$u^*(t) = \begin{cases} \frac{\hat{x}(t)/\Delta\tau - \sum_{i=0}^{(t-\Delta\tau)/\Delta\tau} \hat{g}_{II}(i\Delta\tau) u^*(t-i\Delta\tau)}{\hat{g}_{II}(0)}, & u^*(0) = 0, \quad t < t_0, \\ u(t), & t \geq t_0, \end{cases} \quad (3.65)$$

Необходимо отметить, что оценки импульсных переходных функций $\hat{g}_I(t)$ и $\hat{g}_{II}(t)$ должны быть ненулевыми в момент времени $t = 0$. Смысл генерации исправленного входного процесса заключается в том, что путем численного решения дискретного аналога интегрального уравнения свертки относительно $u(t)$ мы «заставляем» модель повторить предыдущий участок траектории $\hat{x}(t)$, но с новой ИПФ, обеспечивая сопряжение предыдущей и последующей локальных линейных компонент модели.

Для случая, когда идентифицируемый процесс имеет ненулевые начальные условия, и переходы между локальными линейными моделями происходят многократно, введем следующий алгоритм с корректировкой значений времени. Пусть Δt - временной интервал, необходимый для того, чтобы синхронизировать выходные процессы предыдущей и текущей локальных моделей. Рисунок 3.31 поясняет необходимые преобразования временной переменной [25].

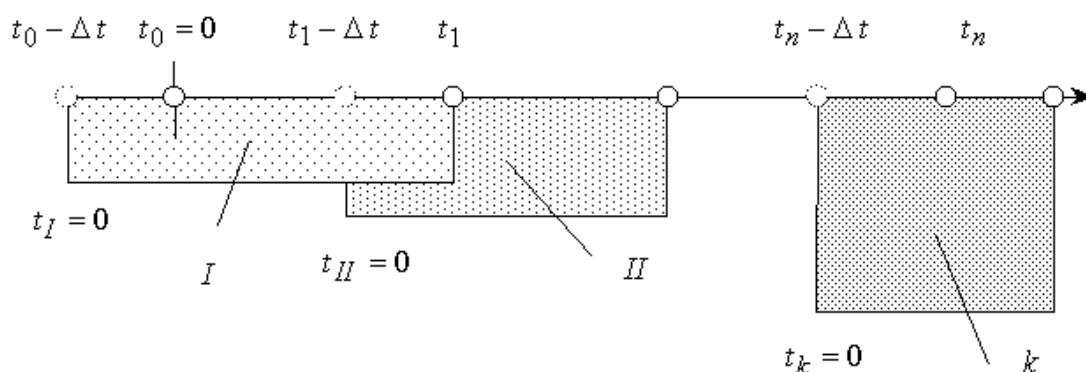


Рисунок 3.31. Преобразование временных интервалов для линейаризации непараметрической модели

На рисунке 3.31 показана временная ось, на которой сверху в абсолютной шкале обозначены моменты переключения между локальными моделями: t_0, t_1, \dots, t_n . Этим моментам предшествуют моменты начала расчета локальных

моделей $t_0 - \Delta t, t_1 - \Delta t, \dots, t_n - \Delta t$. «Время жизни» каждой локальной модели показано на рисунке заштрихованными областями с обозначениями I, II, \dots, k . Для расчетов используются временные переменные для каждой локальной модели, лежащие в интервалах: $t_I \in [0, t_1 - t_0 + \Delta t]$, $t_{II} \in [0, t_2 - t_1 + \Delta t], \dots$, $t_k \in [0, t_{n+1} - t_n + \Delta t]$. В итоге получили j -ю линейную модель процесса:

$$\hat{x}_j(t_j) = \sum_{i=0}^{t_j/\Delta\tau} \hat{g}_j(i\Delta\tau) u_j^*(t_j - i\Delta\tau) \Delta\tau, \quad j \in \{I, II, \dots, k\}, \quad (3.66)$$

где $\hat{g}_j(t_j)$ - импульсная переходная функция, $u_j^*(t_j)$ - исправленный входной процесс j -ой линейной модели. Исправленный входной процесс рассчитывается по формуле [25]:

$$u_j^*(t_j) = \begin{cases} \frac{\hat{x}_j(t_j)/\Delta\tau - \sum_{i=0}^{(t_j-\Delta\tau)/\Delta\tau} \hat{g}_j(i\Delta\tau) u_j^*(t_j - i\Delta\tau)}{\hat{g}_j(0)}, & t_j < \Delta t, \\ u_j^*(0) = 0, & \\ u_j(t_j), & t_j \geq \Delta t, \end{cases} \quad (3.67)$$

где $\hat{x}_j(t_j)$ - модель выходного процесса, построенная на предыдущем этапе и используемая для синхронизации текущей модели с предыдущей. В процессе настройки первой линейной модели значения $\hat{x}_I(t_I)$ при $t_I < \Delta t$ представляют собой «предысторию» процесса и могут быть известны априори. В противном случае значения $\hat{x}_I(t_I)$, $t_I < \Delta t$ могут быть выбраны в соответствии с определёнными предположениями о состоянии процесса в начальный момент времени.

Для иллюстрации алгоритма приведем пример идентификации временной зависимости температуры нагревателя при известном входном процессе – напряжении, подаваемом на нагревательный элемент [25]. На рисунке 3.32 представлена статическая характеристика нагревателя, модель МНК – полином

5-го порядка, построенная по измеренной статической выборке «напряжение-температура».

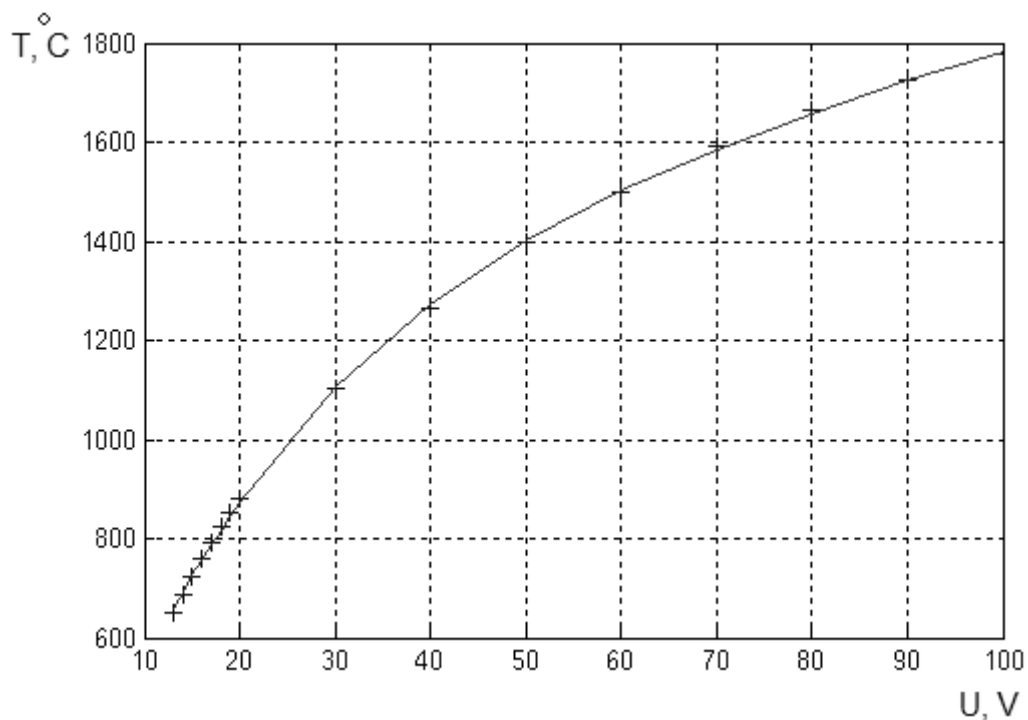


Рисунок 3.32. Статическая характеристика нагревателя

Для изучения динамических свойств процесса нагрева проведена серия экспериментов по снятию переходных функций (рисунок 3.33).

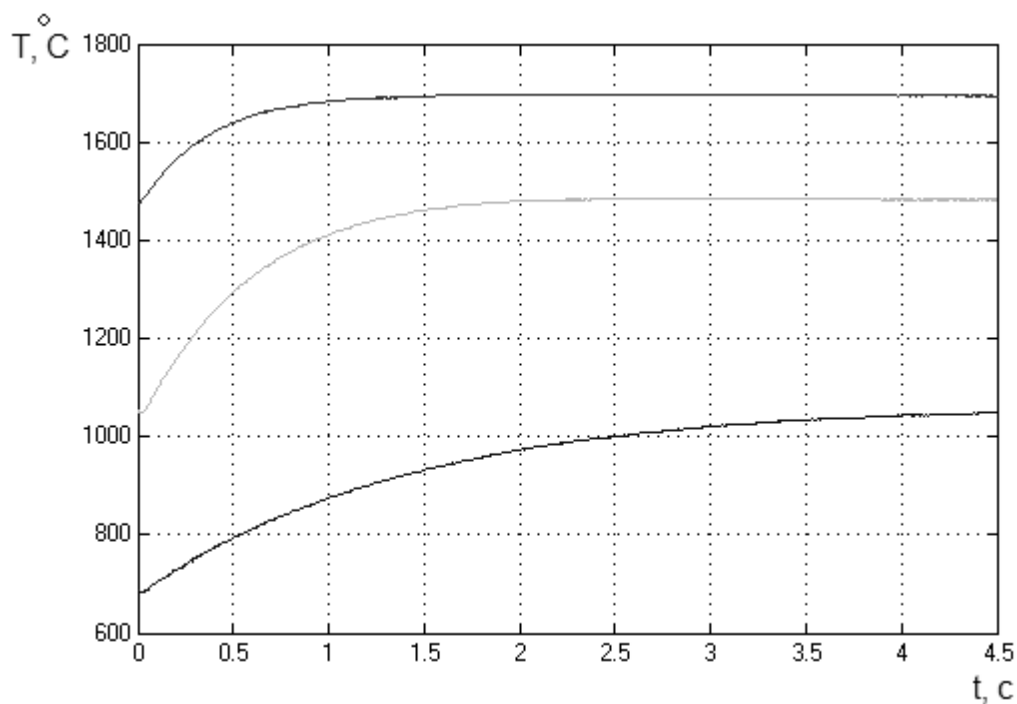


Рисунок 3.33. Переходные функции для процесса нагрева для трех областей линейности

На рисунке 3.33 реализации переходных функций покрывали следующие области, соответствующие значениям напряжения: $u_I(t) \in [13, 25]$, $u_{II}(t) \in [25, 50]$, $u_{III}(t) \in [50, 75]$. Эти области условно принимаются за области линейного описания.

Статическая характеристика в настоящем примере является однозначной функцией. Это свойство было использовано для дальнейшей обработки результатов измерений, а именно для отыскания оценки обратной статической характеристики объекта. Выходная величина переходных характеристик была преобразована с учетом обратной нелинейной характеристики объекта. Таким образом, для дальнейшего исследования была выделена динамическая составляющая модели Винера. Подход к непараметрической идентификации в классе моделей Винера был описан в [22], [245] и др. Однако, так как объект идентификации относится к классу существенно нелинейных, динамический блок в схеме Винера также целесообразно принять нелинейным. В дальнейшем с использованием предложенных алгоритмов решалась задача построения его линеаризованной модели.

На основе полученных переходных функций при помощи непараметрических алгоритмов были построены оценки ИПФ для локальных областей, которые показаны на рисунке 3.34.

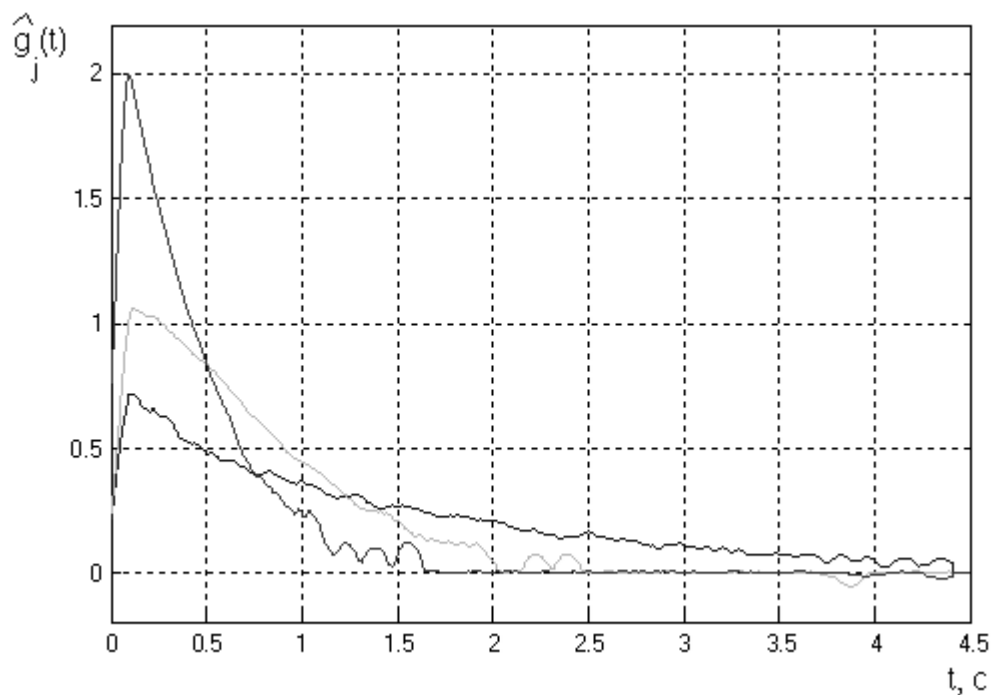


Рисунок 3.34. Непараметрические оценки импульсных переходных функций

Для верификации алгоритма использовали измерения температуры нагревателя в случае, когда напряжение на нагревательном элементе возрастало линейно со временем. Предполагалось, что в начальный момент времени система находится в состоянии покоя, т.е. её начальные условия кроме установившейся величины температуры в начальный момент времени приняты нулевыми. Пользуясь соотношением (3.67), для каждой области линейности оценивали исправленный входной процесс, корректирующий начальные условия соответствующей линейной компоненты модели. На рисунке 3.35 показаны рассчитанные желаемый выход объекта и исправленный входной процесс для одной из областей линейности ($j = 3$). В приведённом примере для повышения точности идентификации расчетный выход модели изменяли не скачкообразно, как это предусматривает алгоритм (3.67), а в соответствии с линейным законом от нуля до величины задания в момент переключения линейных моделей. Такая модификация способствует повышению точности и уменьшает вероятность неустойчивого поведения процедуры (3.67).

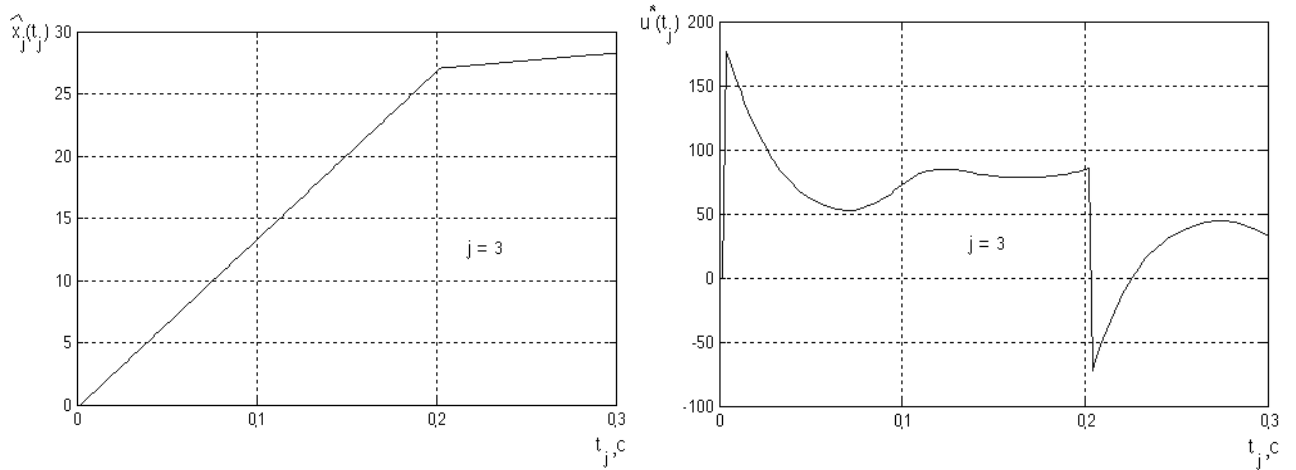


Рисунок 3.35. Желаемый выход объекта $\hat{x}_j(t_j)$ и исправленный входной процесс $u_j^*(t_j)$ для одной области линейности ($j = 3$)

На рисунке 3.36 представлено сравнение измеренного выходного процесса $x(t)$, линейризованной параметрической $\hat{x}_p(t)$ и непараметрической $\hat{x}(t)$ моделей. Параметрическая модель представляла собой динамическую модель, составленную из линейных динамических моделей 2-го порядка.

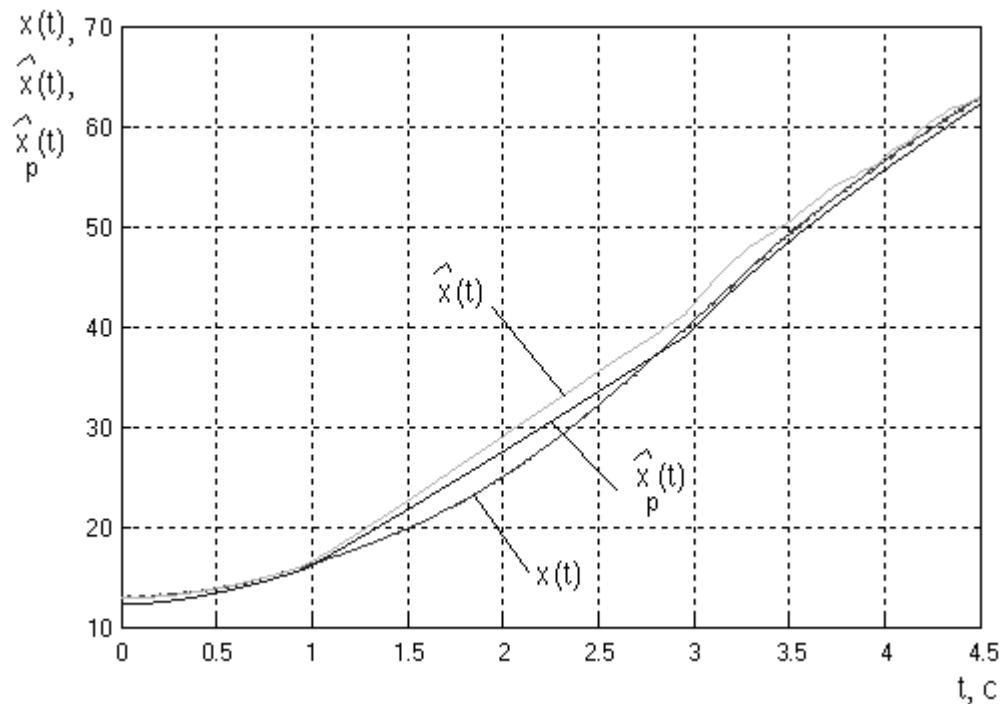


Рисунок 3.36. Сравнение измеренного выходного процесса $x(t)$, линейризованной параметрической $\hat{x}_p(t)$ и непараметрической $\hat{x}(t)$ моделей

Полученные результаты показали, что точность идентификации с использованием параметрической и непараметрической моделей отличается незначительно. Среднеквадратическая ошибка по сравнению с измеренным выходным процессом составили: $\varepsilon_p = 1.57$ для параметрической модели и $\varepsilon_n = 5.7$ для непараметрической.

Системы путевого подогрева нефти используются для обеспечения транспортировки вязких нефтей и нефтепродуктов [223]. Одним из конструктивных решений систем подогрева является электрический подогрев с использованием электрических нагревательных элементов. Описанный подход может применяться для прогноза температуры нагревательного элемента такой системы. Аналогично рассмотренному примеру моделирования и прогноза температуры системы быстрого нагрева, для которых описанный подход показал хорошие результаты, аналогичные результаты ожидаются и для путевых систем подогрева вязкой нефти и нефтепродуктов [208]. Следовательно, для модельного описания нагревательных элементов, входящих в такие системы, предложенные алгоритмы могут быть рекомендованы к широкому применению.

Выводы по главе 3

Практическое применение методов идентификации с привлечением непараметрических моделей линейной динамики невозможно без определённых процедур, которые позволяют подтвердить факт линейности динамического процесса или объекта, а значит и адекватность построенных моделей. Во второй главе диссертации предложены подходы к проверке гипотезы линейности объекта моделирования. Их можно разделить на две группы - одни используют проверку корреляционной зависимости линейной динамической модели и усреднённых выборочных значений, другие основаны на исследовании среднеквадратической ошибки описания процесса в терминах

линейной динамики. В качестве основополагающего атрибута линейности во всех случаях используется принцип суперпозиции. Наличие помех приводило к необходимости сглаживания исходной выборки. Для этих целей были использованы непараметрические алгоритмы идентификации статических объектов.

Исследования асимптотических результатов сходимости сконструированных критериев линейности показали, что стремление объема доступной выборки, содержащей информацию об объекте, к бесконечности приводит к исчезновению ошибки среднего значения относительной меры нелинейности, обусловленной влиянием случайных помех.

Ввиду исключительной важности задачи проверки гипотезы линейности динамических систем, предлагается в ходе решения практических задач идентификации не ограничиваться проверкой одного критерия линейности, а исследовать всю совокупность имеющихся критериев и только на основе сопоставления полученных результатов принимать решение о допустимости описания объекта или процесса с применением линейных моделей.

Для случая, когда объект не может быть описан в терминах линейных моделей, предложен алгоритм линеаризации моделей динамических систем. С целью стыковки линейных моделей разработан способ и алгоритмы учета начальных условий в процессе линеаризации моделей динамических процессов. Приведена иллюстрация применения алгоритмов для идентификации траектории изменения температуры в системах, аналогичных технологическим системам путевого подогрева нефти и нефтепродуктов в трубопроводах. Алгоритмы реализованы с использованием математического пакета Matlab/Simulink.

Глава 4. Адаптивные модели многосвязных статических систем на примере модели гидравлической сети

4.1. Идентификация комбинированных многосвязных систем

Обсуждая классификацию математических моделей в соответствии с типом используемой априорной информации в первой главе диссертации, мы утверждали, что методология построения моделей напрямую зависит от того к какому уровню информации относится решаемая задача идентификации. Однако, нередки случаи, когда априорные сведения складываются из комбинации различных типов информации. Модели процессов, которые строятся при данных условиях, будем называть *комбинированными математическими моделями* [104], [128].

Очевидно, что более полный учет доступных сведений о характере зависимостей между переменными объекта положительно скажется на качестве получаемых моделей. Вследствие этого, в настоящее время к проблеме построения моделей объектов, сведения о которых соответствуют одновременно различным уровням априорной информации, проявляется значительный интерес [103], [104], [128].

В качестве априорной информации могут выступать фундаментальные законы, описывающие взаимосвязь переменных модели, зависимости между переменными, известные с точностью до набора параметров, а также зависимости с неизвестной структурой между входными и выходными переменными объекта.

Комбинированная модель представляет собой систему уравнений, состоящую из соотношений трех типов: известных точно, параметризованных, и не параметризованных и заданных качественно с точностью до набора переменных. При построении комбинированных моделей сведены к минимуму процедуры эвристического анализа, в том числе проверки предположений об общей структуре модели с точностью до набора параметров [103]. Если

известны некоторые зависимости между переменными, либо структура некоторых соотношений известна с точностью до набора параметров, то эти сведения в обязательном порядке используются при построении модели.

Объекты идентификации нередко характеризуются сложной структурой взаимных связей между различными технологическими параметрами, выступающими в роли переменных при построении модели. Структурная схема таких объектов представляет собой *многосвязную систему*, где часть выходных переменных одной технологической цепочки (подсистемы) является входными переменными для другой, причем такая структура может включать многочисленные обратные связи. В связи с этим, такая система описывается не в традиционной форме «вход – оператор связи – выход», а в виде системы неявных уравнений [103], [229]. Таким образом, исходя из способа математического представления модели, определим, что объект, описываемый системой неявных функции от входных и выходных переменных, является *многосвязным*.

Внутренние связи между входными переменными X и выходными переменными Y многосвязной системы могут быть представлены системой, состоящей из l уравнений [104]:

$$\begin{cases} F_j(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{1, p} \\ F_j(X^{(j)}, Y^{(j)}, \alpha_j) = 0, j = \overline{p+1, m} \\ y_j - \varphi_j(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{m+1, l} \end{cases} \quad (4.1)$$

где $F_j, j = \overline{1, m}$ – известные уравнения системы, включая $m - p$ уравнений, известных с точностью до вектора параметров $\alpha_j, j = \overline{p+1, m}$; $X^{(j)} \subset X$, $Y^{(j)} \subset Y$ – векторы, составленные из компонент векторов X и Y , имеющих соответственно размерности k и l , входящих в j -е уравнение. $\varphi_j, j = \overline{m+1, l}$ – функции неизвестного вида, представленные с точностью до своих аргументов.

Пусть имеется выборка наблюдений входных и выходных переменных объекта: $\{X[t], Y[t]\}, t = 1, 2, \dots, n$. При этом предполагаем, что объект подвержен

действию неконтролируемых возмущений, со случайными погрешностями, имеющими нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию.

Процесс построения модели многосвязных объектов состоит из *двух этапов*.

Первый этап заключается в построении алгебраической системы уравнений [103]:

$$\begin{cases} F_j(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{1, m}, \\ y_j - \varphi_j(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{m+1, l}, \end{cases} \quad (4.2)$$

где

$$\varphi_j(X^{(j)}, Y^{(j)}) = \frac{\sum_{t=1}^n y_j[t] \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)} - x_i^{(j)}[t]}{c_{ni}^x}\right) \prod_{i=1}^{\dim Y^{(j)}} \Phi\left(\frac{y_i^{(j)} - y_i^{(j)}[t]}{c_{ni}^y}\right)}{\sum_{t=1}^n \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)} - x_i^{(j)}[t]}{c_{ni}^x}\right) \prod_{i=1}^{\dim Y^{(j)}} \Phi\left(\frac{y_i^{(j)} - y_i^{(j)}[t]}{c_{ni}^y}\right)} \quad (4.3)$$

– непараметрические оценки качественных зависимостей при $j = \overline{m+1, l}$ по наблюдениям вектора состояний объекта. Ядерные функции $\Phi(\cdot)$ и параметры размытости c_{ni} удовлетворяют условиям сходимости [127].

При фиксированном объеме статистических данных $\{X[t], Y[t]\}, t = \overline{1, n}$ качество аппроксимации с помощью непараметрических оценок кривой регрессии зависит от выбранных ядерных функций и коэффициентов размытости, определяющих полуширину интервала финитности ядра [127]. Определение конкретных значений параметров размытости, входящих в уравнения (4.3), осуществляется из условий минимума среднеквадратического критерия [127]:

$$W(c_{nj}) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(y_j[t] - \varphi_j(X^{(j)}[t], Y^{(j)}[t]) \right)^2, \quad (4.4)$$

где совокупный вектор коэффициентов размытости c_{nj} определен как j -ое подмножество вектора $(c_{n1}^x, \dots, c_{nk}^x, c_{n1}^y, \dots, c_{n(l-m)}^y)$.

В выражении критерия (4.4) вычисление t -ой разности на основе статистики (4.3) производится в скользящем режиме по выборке $\{X[t], Y[t]\}, t = \overline{1, n}$, исключая t -ую ситуацию при суммировании числителя и знаменателя оценки [127].

Второй этап состоит в решении системы уравнений при заданном входном воздействии $X = \tilde{X}$ с применением численных методов, например, метода Ньютона [103]. Альтернатива использованию семейства методов Ньютона является подход к непараметрическому оцениванию решения системы уравнений (4.1) [104].

Рассмотрим частный случай идентификации замкнутых многосвязных объектов. В качестве оценки решения замкнутых алгебраических систем уравнений (4.1) принимается статистика [103]:

$$y_{nj} = \frac{\sum_{t=1}^n y_j[t] \prod_{i=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_i[t]}{c_{nj}}\right)}{\sum_{t=1}^n \prod_{i=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_i[t]}{c_{nj}}\right)}, j = \overline{1, l}, \quad (4.5)$$

где $\varepsilon_j[t], j = \overline{1, l}, t = \overline{1, n}$ – компоненты рабочей выборки вектора невязок $\varepsilon[t]$, специальным образом сгенерированной на основе исходной выборки «вход-выход», а именно:

- для известных уравнений системы (4.1):

$$\varepsilon_j[t] = F_j(\tilde{X}, Y^{(j)}[t]), j = \overline{1, m}, t = \overline{1, n}; \quad (4.6)$$

- для неизвестных уравнений системы, заданных качественно с точностью до входных и выходных переменных:

$$\varepsilon_j[t] = y_j[t] - \frac{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n y_j[K] \prod_{i=1}^{\dim Y^{(j)}} \Phi\left(\frac{y_i^{(j)}[t] - y_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^y}\right) \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)}[t] - x_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^x}\right)}{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n \prod_{i=1}^{\dim Y^{(j)}} \Phi\left(\frac{y_i^{(j)}[t] - y_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^y}\right) \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)}[t] - x_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^x}\right)}, \quad (4.7)$$

где $j = \overline{m+1, l}$.

Перейдем к процедуре оценивания параметров второй подгруппы системы уравнений (4.1). Предположим, что измерения входных и выходных переменных $\{X[t], Y[t]\}$ будут поступать последовательно в каждый момент времени $t = \overline{1, n}$.

В качестве процедуры оценки параметров уравнений системы (4.2) в случае, если они неизвестны, будем использовать модификацию вероятностных итерационных алгоритмов [266], [254], [53], известную как процедура Кифера-Вольфовица [254], [103]. На s -ой итерации оценка параметра α_j выражается рекуррентной формулой:

$$\alpha_j[s] = \alpha_j[s-1] - \gamma_j^{(i)}[s] \cdot F_i(X^{(i)}[s], Y^{(i)}[s], \alpha^{(i)}[s-1]), \quad j = \overline{1, p}, i = \overline{1, m}, \quad (4.8)$$

где коэффициенты $\gamma_j^{(i)}[s]$, определяющие длину шага, удовлетворяют условиям Роббинса-Монро [266]. На практике коэффициенты принимают в следующем виде:

$$\gamma_j^{(i)}[s] = \frac{const}{s}. \quad (4.9)$$

Описанные процедуры построения моделей комбинированных многосвязных объектов используются для моделирования гидравлической сети.

4.2. Модель гидравлической сети и особенности её синтеза

В научной и отраслевой литературе, в частности, в [118], [144], [145], предлагаются различные варианты построения моделей гидравлических сетей. Многочисленные работы, например [91], посвящены методологии построения динамических моделей процессов, происходящих в гидравлических сетях. Зачастую, речь идет о моделях, основанных на привлечении законов гидродинамики, выраженных в системах уравнений в частных производных для описания распределенных систем. Подход, который используется в таких работах, требует наличия исчерпывающей информации о физических характеристиках перекачиваемой жидкости, характере её течения, внутреннем

профиле и геометрической конфигурации трубопровода, подробных сведений о характеристиках и параметрах функционирования насосных агрегатов. Во множестве случаев такие модели сложны в вычислительном плане, требуют учета неизвестных, часто неизмеримых или непредсказуемо меняющихся во времени и в пространстве параметров.

Один из предлагаемых подходов к идентификации трубопроводных систем основывается на представлении структуры гидравлической системы в виде плоского связного орграфа с определенным набором вершин (узлов), ребер (ветвей) и граней (контуров) и позволяет решать задачи стационарного потокораспределения. Модель, построенная в рамках такого подхода, представляет собой большую систему нелинейных уравнений, составленную в соответствии с законами Кирхгофа для графа трубопроводной сети [203]. Полученные системы уравнений можно решить численно градиентными методами, такими как метод Ньютона [118], реализация которого известна в теории гидравлических систем как *метод контурных расходов* [144]. Использование перечисленных методов сопровождается большими вычислительными трудностями, поэтому их применение ограничено количеством уравнений (на практике обычно не более нескольких сотен). Зачастую сталкиваются с неустойчивостью ньютоновских методов. Скорость сходимости метода Ньютона в большой степени зависит от начального приближения, что следует из естественной ограниченности, т.е. его локальности. На практике для систем уравнений высокой размерности точность задания начального приближения должна быть достаточно высока для того, чтобы найти решение в допустимых пределах точности.

Другой метод решения задачи стационарного потокораспределения – модифицированный метод последовательных приближений (МПП) [144]. Данный алгоритм является модификацией метода Ньютона, с более высоким показателем скорости сходимости при достаточно произвольном выборе начального приближения [143]. Он позволяет решать системы уравнений более высокой размерности (число неизвестных от 1000 до 20000).

Модель гидравлической сети будем рассматривать на примере магистральной нефтепроводной сети [93], [193]. *Магистральный нефтепровод* представляет собой сложный технический объект, в состав которого входят следующие типы сооружений [197]:

- *линейные участки* – трубы, с расположенными на них секущими задвижками и лупингами (трубами, проложенными параллельно основным в зонах с повышенным риском аварии), станциями протекторной и катодной защиты, камерами запуска (пропуска) скребка или диагностического снаряда;

- *резервуарные парки* с секущими (распределительными) задвижками, резервуарами, вспомогательными и опорными насосными станциями, регуляторами смешения нефти на потоке;

- *магистральные нефтеперекачивающие станции* с насосными агрегатами, электромоторами, входными фильтрами, устройствами сглаживания ударных волн и регуляторами давления;

- *вспомогательное оборудование*, включающее системы автоматического пожаротушения и др.

Магистральный нефтепровод как *объект идентификации* - это сложная система с перестраиваемой структурой и изменяющимися параметрами [197]. Схематическое представление входных и выходных параметров магистрального нефтепровода ранее было представлено на рисунке 1.1.

Схему магистрального нефтепровода можно подвергнуть декомпозиции и представить в виде структурной диаграммы участков, сооружений и других подсистем со связями между ними. Пример такой структурной схемы изображен на рисунке 4.2 [1].

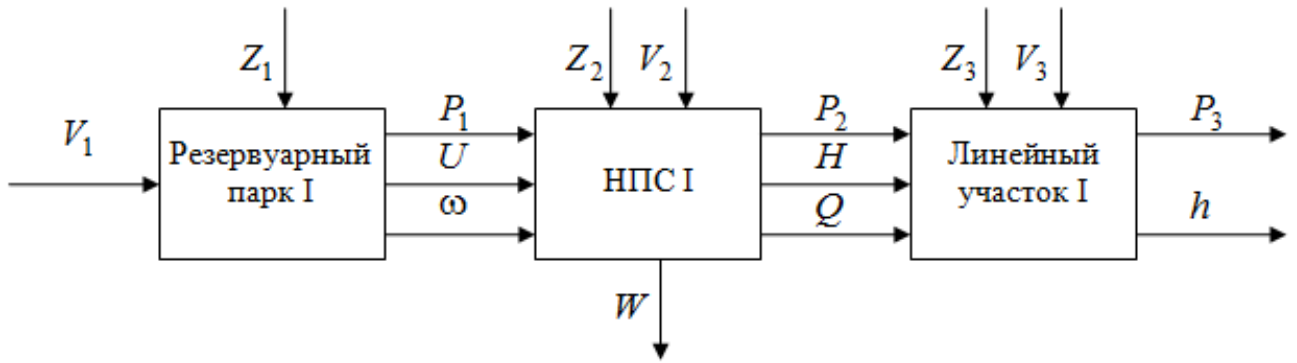


Рисунок 4.2. Пример структурной схемы фрагмента магистрального трубопровода

Легко заметить, что многие выходные параметры одновременно выступают в качестве входных, определяющих течение технологического процесса. Этот факт указывает на *многосвязный характер* рассматриваемого объекта [1]. Свойством многосвязности кроме магистрального нефтепровода обладают многие сложные объекты мониторинга и управления, например, к многосвязным процессам можно отнести процессы в нефтепереработке [157].

Структуру магистрального нефтепровода удобно представить в виде графа. На рисунке 4.3 представлена структура примерного фрагмента магистрального нефтепровода.

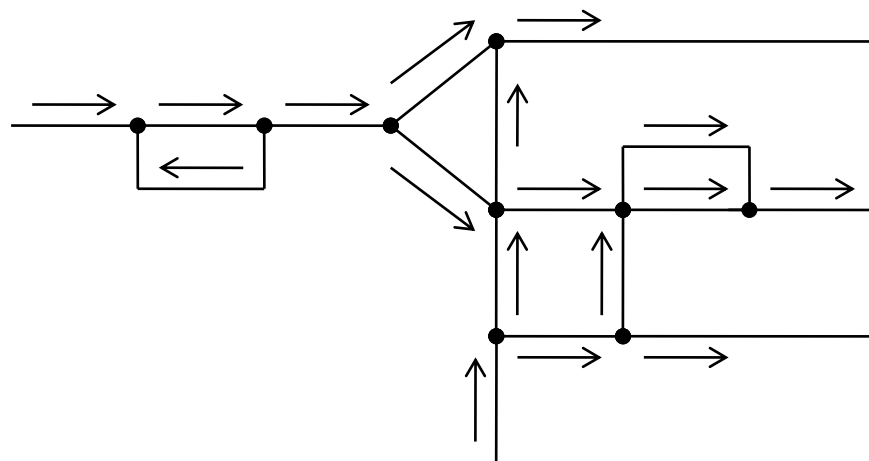


Рисунок 4.3. Структура фрагмента магистрального нефтепровода, представленная в виде графа

Линейные участки нефтепровода совместно с нефтеперекачивающими станциями представим дугами графа (рисунок 4.3), соединение этих участков – узлами. Стрелками возле дуг графа показаны направления потока в

соответствующих участках трубопровода. Жирными точками обозначены узлы графа. Далее будем предполагать, что граф гидравлической сети содержит n дуг и k узлов.

Стационарная модель распределения потоков может быть получена в соответствии с первым и вторым законами Кирхгофа для гидравлических сетей, которые формулируются следующим образом [144]:

Первый закон Кирхгофа: Сумма входящих и выходящих расходов для любого узла равна нулю. Для узла с индексом $i=1,2,\dots,k-1$ это утверждение можно представить следующим равенством:

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} = 0, \quad (4.10)$$

где q_{ij} – объемный расход по j -ой трубе, связанной с i -м узлом. Расход входит в уравнение с учетом знака. Входящие в узел потоки принимаются положительными, а исходящие – отрицательными.

Следует обратить внимание на то, что количество уравнений, составленных в соответствии с первым законом Кирхгофа на единицу меньше количества узлов в гидравлической сети. Это обусловлено действием закона сохранения потоков, который приводит к линейной зависимости уравнения для k -го узла от предыдущих $k-1$ уравнений [118].

При наличии внешних притоков (отборов) в узлах используют следующую запись уравнений, составленных в соответствии с первым законом Кирхгофа [118], [144]:

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} x_j = q_i, \quad (4.11)$$

где c_{ij} – коэффициент, значение которого выбирается из множества $C = \{1, -1, 0\}$ в зависимости от наличия связи j -ой трубы с i -м узлом и направления потока; x_j – абсолютное значение объемного расхода по j -ой трубе, $j = 1, 2, \dots, n$; q_i – внешний приток (отбор) в i -м узле, $i = 1, 2, \dots, k - 1$.

Второй закон Кирхгофа: Сумма изменений напора на всех участках любого замкнутого контура равна нулю. Для контуров с индексами $i = 1, 2, \dots, n - k + 1$ соответствующие закону уравнения имеют вид [144]:

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} \Delta H_j = h_i, \quad (4.12)$$

где c_{ij} – коэффициент, зависящий от направления обхода контура и наличия соответствующей трубы в контуре, $c_{ij} \in \{1, -1, 0\}$; ΔH_j – падение напора в j -ой трубе; h_i – сумма действующих напоров с учетом знака по всем дугам i -го контура.

Второй закон Кирхгофа дополняют эмпирической зависимостью падения гидравлического напора на участке сети:

$$\Delta H_j = f(q_j). \quad (4.13)$$

Для трубопроводных сетей считается оправданным использование зависимости вида [144]:

$$f(q) = \lambda |q|^{\beta-1} q, \quad (4.14)$$

где λ – гидравлическое сопротивление; β – степень в законе зависимости величины падения напора от значения объемного расхода. Для расчета нефтепроводов этот коэффициент обычно принимают $\beta \approx 1,75$. Это следует из того, что для течения нефти средней вязкости в области гидравлически гладких труб для расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ при заданном числе Рейнольдса Re применяют закон Блазиуса: $\lambda = 0,316/Re^{0,25}$ [203].

После унификации индексов коэффициентов для линейных и нелинейных уравнений, итоговая система принимает следующий вид [118]:

$$\begin{aligned}
c_{11}x_1 + \dots + c_{1n}x_n &= q_1, \\
\dots & \\
c_{k-1,1}x_1 + \dots + c_{k-1,n}x_n &= q_{k-1}, \\
c_{k1}\lambda_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{kn}\lambda_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n &= h_1, \\
\dots & \\
c_{n1}\lambda_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{nn}\lambda_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n &= h_{n-k+1}.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Решение такой системы уравнений относительно неизвестных расходов x_i является единственным [203] и может быть найдено с использованием метода Ньютона. Однако для расширения области сходимости для процесса отыскания решения требуется применение специальных методов. Так, для решения системы (4.15) в работе [144] указывается на целесообразность применения *метода последовательных приближений с инерцией*.

Идентификация параметров гидравлического сопротивления невозможна без наличия информации о значениях расходов или давлений для каждой из труб – выборки измерений состояний функционирования трубопроводной сети. При отсутствии выборки для некоторого множества труб гидравлической сети, система (4.15) преобразуется к эквивалентному виду путем объединения двух участков без датчиков, которые имеют общий узел с нулевым отбором [144].

Правые части второй группы уравнений в системе (4.15) имеют смысл действующих напоров в соответствующих контурах модели. Для обеспечения этих напоров и создания потока нефти по трубопроводу, используют нефтеперекачивающие станции (НПС). Основное назначение НПС состоит в том, чтобы забрать нефть из сечения трубопровода с низким напором, увеличить этот напор и затем ввести транспортируемую нефть в сечение трубопровода с высоким напором. Главным элементом НПС являются насосы, *устройства для принудительного перемещения жидкости от сечения с меньшим значением напора к сечению с большим значением напора* [90]. Насосы приводятся в действие электрическими двигателями. Насосы оснащаются дополнительными устройствами, такими как регуляторы давления.

Для перекачки нефти по трубопроводам используются, как правило, центробежные насосы, в которых необходимый напор создается за счет центробежной силы [90]. Их характеристики приводятся в специальных каталогах. Они представляют собой зависимость *дифференциального напора, потребляемой мощности, коэффициента полезного действия и допустимого кавитационного запаса от подачи (расхода) насоса* [90].

Гидравлическая характеристика – зависимость суммарных потерь напора (или давления) от расхода:

$$\sum h = f(Q). \quad (4.16)$$

Основные характеристики насоса - это *расходно-напорная характеристика (гидравлическая характеристика насоса)*:

$$h = h(Q), \quad (4.17)$$

где h - дифференциальный напор, вырабатываемый насосом при заданном расходе Q , а также *зависимость КПД от расхода*:

$$\eta = \eta(Q). \quad (4.18)$$

Производители оборудования представляют характеристики насосов в графической форме. Однако, для решения практических задач, применяют аппроксимационные формулы для соответствующих характеристик. Используется, как правило, квадратичная аппроксимация [90].

Технологический режим работы нефтепровода определяется как конфигурацией сети, так и вариантом включения насосов на насосных станциях. Применяется параллельное включение двух и более насосов, последовательное или параллельно-последовательное включение нескольких насосов с одинаковыми или различными характеристиками [90].

Для увеличения суммарной производительности (расхода) применяют параллельное включение насосов. Способ включения насосов обусловлен также борьбой с *кавитационными явлениями*. Для безаварийной работы насоса необходимо, чтобы минимальное давление на входе в него превышало давление насыщенных паров перекачиваемой среды на величину разности допустимого

кавитационного запаса и скоростного напора на входе в насос [90]. Для обеспечения этого условия стремятся не превышать определенного перепада напоров на входе и выходе насоса, следовательно, для достижения требуемого градиента напоров применяют последовательное включение насосов (подпорных и основного).

Кроме варианта включения насосов в настоящее время на магистральных нефтепроводах все более широкое применение находит задание режимов работы изменением частоты вращения ротора насосов [90].

4.3. Адаптивная комбинированная модель гидравлической сети при установившихся режимах её работы

В настоящее время в качестве основной модели установившихся режимов работы нефтепроводов принимается статическая модель в виде системы уравнений (4.15), составленной в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети [143]. Модель чаще всего состоит из большого количества уравнений, т.е. относится к классу *больших моделей*. Использование модели (4.15) связано с решением двух задач:

1. Нахождение неизвестных значений расходов сети при заданных значениях активных напоров – идентификация сети (*прямая задача*);
2. Настройка параметров гидравлического сопротивления – идентификация параметров гидравлического сопротивления (*обратная задача*)

Пользуясь моделью вида (4.15) на предприятиях, эксплуатирующих трубопроводные сети, в том числе и магистральные нефтепроводы, производится расчет некоторого множества возможных технологических режимов работы сети. По результатам моделирования, вычисляются значения расходов по каждой из труб и значения активных напоров сети, необходимых для обеспечения заданного отбора в узлах. Процесс моделирования технологических режимов является обязательной процедурой и регламентируется руководящей документацией (РД) предприятий.

К алгоритмам решения системы нелинейных уравнений (4.15) предъявляются требования как по скорости, так и по точности производимых расчетов. При этом более жесткие требования предъявляются именно к скорости отыскания решения. Можно выделить два варианта решения расчетной задачи в зависимости от приоритетов:

1. Расчет технологических режимов, планируемых к осуществлению в ближайшем будущем. Здесь основным приоритетом является точность приближения решения к истинным технологическим показателям. Основным алгоритмом, применяемым для решения систем уравнений вида (4.15) в нефтепроводных компаниях Западной и Центральной Сибири и обеспечивающим высокую точность нахождения решения, является модифицированный метод последовательных приближений (ММПП) [144].

2. Расчет технологических режимов, которые могут возникнуть с той или иной вероятностью вследствие наступления различных ситуаций: штатных и нештатных. Для обеспечения поддержки технологических режимов в этом случае необходимы средства *экспресс-прогноза*. Приоритет в данном случае принадлежит скорости расчета.

Таким образом, существует необходимость разработки средств и алгоритмов *экспресс-прогноза* технологических режимов функционирования трубопроводных сетей.

В общем случае, на точность нахождения решения в рамках прямой задачи кроме варианта используемого метода в значительной степени влияет точность принятых в модели значений параметров, в частности величин гидравлического сопротивления. На практике в настоящее время для решения задачи идентификации параметров гидравлического сопротивления применяется метод наименьших квадратов, либо задача сводится к эквивалентной задаче линейного программирования [144].

Применение метода наименьших квадратов к системе (4.15) для идентификации параметров гидравлического сопротивления, приводит к переопределенной системе нелинейных уравнений. Решение такой системы

уравнений относится к классу некорректных задач, так как полученная система может и не имеет решений. На практике установлено, что такой подход позволяет производить настройку параметров гидравлического сопротивления только в случае небольших размерностей (для сетей с количеством участков не более 200). Для сетей больших размерностей не всегда удается получить решение с приемлемой точностью для всех коэффициентов гидравлического сопротивления [144].

В названных условиях для решения задач экспресс-прогноза технологических режимов путем отыскания решения системы (4.15) целесообразным является применение алгоритмов идентификации, позволяющих обходить перечисленные трудности, связанные с применением алгоритмов ньютоновского типа. Такими алгоритмами в полной мере являются непараметрические алгоритмы оценки решения систем уравнений в моделях многосвязных систем [103]. Они основываются на статистиках с использованием обучающих выборок, которые являются носителем *текущей информации* о процессах в трубопроводной сети. Предлагаемый подход обладает большой гибкостью при формировании алгоритмов идентификации состояния трубопроводных сетей. При отсутствии информации о значениях коэффициентов гидравлического сопротивления, в рамках предложенного подхода, возможно построение эквивалентной системы уравнений, в которой уравнения для контуров сети (вторая группа уравнения) заменяются их *непараметрическими оценками*. Также возможно построение алгоритмов, решающих прямую и обратную задачу одновременно в режиме реального времени по мере поступления данных с датчиков.

Рассмотрим синтез алгоритма для предложенного подхода на модельном примере [4]. Произведем численное моделирование трехконтурной (трехкольцевой) трубопроводной сети, изображенной на рисунке 4.4 [6], [237].

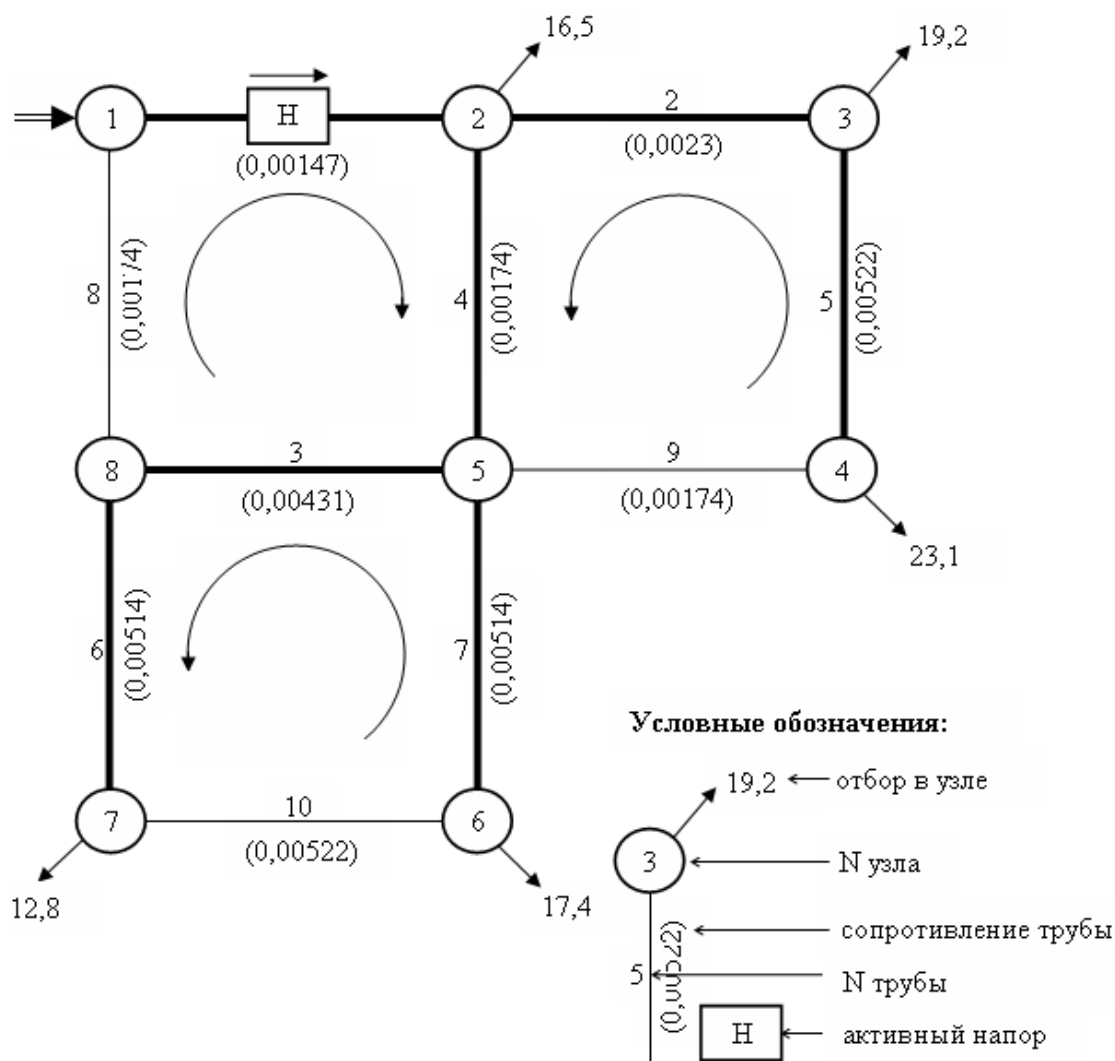


Рисунок 4.4. Схема трехконтурной трубопроводной сети

На рисунке 4.4 стрелками в контурах указаны выбранные направления обхода при записи уравнений для независимых контуров. В цепи имеется одна активная ветвь с действующим напором H . Для формирования независимых контуров сети дуги графа сети подразделяем на *дуги дерева* – подграфа, не содержащего замкнутых контуров, и *хорды* – все остальные дуги исходного графа. Жирными линиями обозначены дуги дерева трубопроводной сети, тонкими хорды. Номера дуг заданы таким образом, что первые номера получили дуги дерева, а оставшиеся хорды. Для простоты описания примем величины параметров сети безразмерными.

Число дуг $n = 10$, узлов $k = 8$, размерность системы $l = 10$. Все трубы, кроме шестой и седьмой стальные и удовлетворяют квадратичному закону

гидравлического сопротивления, шестая и седьмая – пластиковые, для них $\beta = 1.774$. Величина действующего напора $h = 8.3$.

Система уравнений для гидравлической сети, составленная в соответствии законами Кирхгофа для трубопроводной сети и моделью распределения потоков $\Delta H = \lambda x^\beta$ (параметризованная система), была принята в следующем виде [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -x_1 + x_8 = -89 \\ x_1 + x_2 - x_4 = 16.5 \\ -x_2 + x_5 = 19.2 \\ -x_5 + x_9 = 23.1 \\ -x_3 + x_4 + x_7 - x_9 = 0 \\ -x_7 + x_{10} = 17.4 \\ x_6 - x_{10} = 12.8 \\ 0.00147|x_1|x_1 + 0.00431|x_3|x_3 + 0.00174|x_4|^{0.774}x_4 + 0.00174|x_8|^{0.774}x_8 = h \\ 0.0023|x_2|x_2 + 0.00174|x_4|^{0.774}x_4 + 0.00522|x_5|x_5 + 0.00174|x_9|x_9 = 0 \\ 0.00431|x_3|x_3 + 0.00514|x_6|x_6 + 0.00514|x_7|x_7 + 0.00522|x_{10}|x_{10} = 0 \end{array} \right. \quad (4.19)$$

В качестве входных воздействий (активного напора h) определим [24]:

$$\tilde{h}[t] = h \cdot (1 + 2 \cdot A \cdot (\mu[t] - B)), \quad t = \overline{1, n}, \quad (4.20)$$

где A – разброс выборочных значений от начального состояния, $\mu[t], t = \overline{1, n}$ – последовательность случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$, B – параметр сдвига.

Для того чтобы закон распределения ошибки отличался от равномерного, произведем дополнительное преобразование выборочных значения по формуле:

$$H[t] = \tilde{h}[t] \cdot (1 + 2 \cdot S \cdot (R[t] - B)), \quad t = \overline{1, n}, \quad (4.21)$$

где S – амплитуда разброса выборочных значений, $R[t], t = \overline{1, n}$ – последовательность случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$.

Генерацию выборочных значений выходных величин системы (расходов в сегментах гидравлической сети) $X[t] = (x_1[t], \dots, x_l[t])$ при заданном входе $H[t]$ осуществим в ходе решения системы (4.21) методом Ньютона.

Таким образом, в качестве исходной обучающей выборки вектора состояний трубопроводной сети примем искусственно сгенерированную выборку $\{H[t], X[t]\}, t = \overline{1, n}$.

После генерации обучающей выборки можно перейти к построению модели.

Рассмотрим *два варианта моделей трубопроводной сети*.

Вариант I. Модель многосвязной системы для случая, когда уравнения для независимых контуров не могут быть параметризованы. Такая постановка может возникнуть в том случае, если модель вида (4.15) не удовлетворяет требованиям адекватного описания происходящих в сети процессов. Действительно, уравнения для контуров, по сути, являются эмпирическими, а значит, возможны такие режимы работы сети, когда они не могут восприниматься как достоверная априорная информация о системе.

В силу сказанного, для первого варианта можно предложить модель в виде системы уравнений вида (4.1), включающую уравнения первого и третьего типа. То есть уравнения, описывающие независимые контура сети заменяются их непараметрическими аналогами. В этом случае система уравнений для принятого модельного примера трехконтурной сети имеет следующий вид [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
-x_1 + x_8 = -89 \\
x_1 + x_2 - x_4 = 16.5 \\
-x_2 + x_5 = 19.2 \\
-x_5 + x_9 = 23.1 \\
-x_3 + x_4 + x_7 - x_9 = 0 \\
-x_7 + x_{10} = 17.4 \\
x_6 - x_{10} = 12.8 \\
x_8 - \frac{\sum_{t=1}^n x_8[t] \prod_{i=1}^{\dim V^{(8)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(8)} - V_i^{(8)}[t]}{c_{ni}}\right)}{\sum_{t=1}^N \prod_{i=1}^{\dim V^{(8)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(8)} - V_i^{(8)}[t]}{c_{ni}}\right)} = 0 \\
x_9 - \frac{\sum_{t=1}^n x_9[t] \prod_{i=1}^{\dim V^{(9)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(9)} - V_i^{(9)}[t]}{c_{ni}}\right)}{\sum_{t=1}^N \prod_{i=1}^{\dim V^{(9)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(9)} - V_i^{(9)}[t]}{c_{ni}}\right)} = 0 \\
x_{10} - \frac{\sum_{t=1}^n x_{10}[t] \prod_{i=1}^{\dim V^{(10)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(10)} - V_i^{(10)}[t]}{c_{ni}}\right)}{\sum_{t=1}^n \prod_{i=1}^{\dim V^{(10)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(10)} - V_i^{(10)}[t]}{c_{ni}}\right)} = 0
\end{array} \right. \quad (4.22)$$

где $V^{(i)}$ – вектор, составленный из компонент векторов X, H , входящих в i -ое уравнение. Примем $m = 7$ – количество параметризованных уравнений. В качестве ядерной функции $\Phi(\cdot)$ будем использовать функцию Епанечникова [75].

Вначале проведем нормирование компонент вектора аргументов V в соответствующих статистиках:

$$v_j^{(i)} = \frac{v_j^{(i)} - n^{-1} \sum_{t=1}^n v_j^{(i)}[t]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n \left(v_j^{(i)} - n^{-1} \sum_{t=1}^n v_j^{(i)}[t] \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad j = \overline{1, \dim V^{(i)}}. \quad (4.23)$$

Операция нормирования выборки облегчит работу с данными и процесс оптимизации оценок.

Проведем оптимизацию оценок, входящих в систему уравнений, по параметрам размытости:

$$c_{ni}^* = \arg \min_{c_{ni}} \sum_{t=1}^n \left[x[t] - \frac{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n x[K] \prod_{i=1}^{\dim V^{(j)}} \Phi \left(\frac{V_i^{(j)}[t] - V_i^{(j)}[K]}{c_{ni}} \right)}{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n \prod_{i=1}^{\dim V^{(j)}} \Phi \left(\frac{V_i^{(j)}[t] - V_i^{(j)}[K]}{c_{ni}} \right)} \right]^2, i = \overline{m+1, l}. \quad (4.24)$$

Вычислим невязки системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_j[t] = c_{j1}x_1[t] + \dots + c_{jn}x_n[t] - q_j, j = \overline{1, k-1} \\ \varepsilon_j[t] = x_j[t] - \frac{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n x_j[K] \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi \left(\frac{x_i^{(j)}[t] - x_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^*} \right) \prod_{i=1}^{\dim V^{(j)}} \Phi \left(\frac{v_i^{(j)}[t] - v_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^*} \right)}{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi \left(\frac{x_i^{(j)}[t] - x_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^*} \right) \prod_{i=1}^{\dim V^{(j)}} \Phi \left(\frac{v_i^{(j)}[t] - v_i^{(j)}[K]}{c_{ni}^*} \right)}, j = \overline{m+1, l} \end{array} \right. \quad (4.25)$$

Далее, используя вычисленные невязки, отыскиваем оптимальные параметры c_n для последующей оценки вектора выходных переменных модели.

Оптимизация выполняется с использованием следующей процедуры:

$$c_n^* = \arg \min_{c_n} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left[x_j[t] - \frac{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n x_j[K] \prod_{i=1}^l \Phi \left(\frac{0 - \varepsilon_i[K]}{c_n} \right)}{\sum_{\substack{K=1 \\ K \neq t}}^n \prod_{i=1}^l \Phi \left(\frac{0 - \varepsilon_i[K]}{c_n} \right)} \right]^2. \quad (4.26)$$

В качестве метода оптимизации был выбран метод перебора (метод наилучшей пробы), т.е.

$$c_{nk} = c_{n(k-1)} + \tau, k = 1, 2, \dots, s. \quad (4.27)$$

где τ - величина шага процедуры перебора; диапазон поиска значений параметра размытости $[c_{n0}, c_{ns}]$ выбирается на этапе предварительной обработки обучающих выборок.

Оценивание решения системы производим в соответствии со статистикой:

$$x_{nj} = \frac{\sum_{t=1}^n x_j[t] \prod_{i=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_i[t]}{c_n^*}\right)}{\sum_{t=1}^n \prod_{i=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_i[t]}{c_n^*}\right)}, j = \overline{1, l}. \quad (4.28)$$

Вариант II. Модель многосвязной системы для случая, когда уравнения для независимых контуров могут быть параметризованы и представлены в форме системы уравнений вида (4.15), то есть аналогичной системе уравнений (4.1), включающую уравнения первого и второго типа.

Перечислим шаги алгоритма идентификации параметризованной многосвязной нефтепроводной сети, для которой коэффициенты, характеризующие гидравлическое сопротивление, известны.

Шаг 1. Вычислим невязки для каждого уравнения системы:

$$\varepsilon_j[t] = F_j(x^{(j)}[t], h^{(j)}[t]), j = \overline{1, l}, t = \overline{1, n}. \quad (4.29)$$

Шаг 2. Отыскиваем оптимальные параметры c_n :

$$c_{nj}^* = \arg \min_{c_n} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left[x_j[t] - \frac{\sum_{i=1, i \neq t}^n x_j[i] \prod_{v=1}^l \Phi\left(\frac{\varepsilon_v[t] - \varepsilon_v[i]}{c_n}\right)}{\sum_{i=1, i \neq t}^n \prod_{v=1}^l \Phi\left(\frac{\varepsilon_v[t] - \varepsilon_v[i]}{c_n}\right)} \right]^2, j = \overline{1, l}. \quad (4.30)$$

Шаг 3. Произведем оценивание решения системы уравнений с использованием соотношения:

$$x_{nj} = \frac{\sum_{t=1}^n x_j[t] \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_{nj}}\right)}{\sum_{t=1}^n \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_{nj}}\right)}, j = \overline{1, l}. \quad (4.31)$$

В качестве процедуры оптимизации был выбран метод перебора (метод наилучшей пробы) (4.27).

Предположим, что коэффициенты в уравнениях системы (4.19), характеризующие гидравлическое сопротивление, неизвестны. Следовательно, необходимо решать совмещать решение системы с решением обратной задачи (уточнение коэффициентов, входящих в уравнения).

Представим алгоритм оценки решения системы (4.19) с одновременной настройкой коэффициентов в уравнениях второй группы.

Шаг 1. Оценка параметров системы на s -ом шаге:

$$\alpha_j[s] = \alpha_j[s-1] - \gamma_j^{(i)}[s] \cdot F_i(X^{(i)}[s], Y^{(i)}[s], \alpha^{(i)}[s-1]), j = \overline{1, p}, i = \overline{m+1, l}. \quad (4.32)$$

Шаг 2. Вычисление невязок системы на s -ом шаге:

$$\varepsilon_j^{(s)}[t] = F_j(x^{(j)}[t], h^{(j)}[t], \alpha^{(j)}(s)), j = \overline{1, l}, t = \overline{1, n}. \quad (4.33)$$

Шаг 3. Оценка решения системы уравнений на s -ом шаге:

$$x_{nj}(s) = \frac{\sum_{t=1}^n x_j[t] \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j^{(s)}[t]}{c_{nj}}\right)}{\sum_{t=1}^n \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j^{(s)}[t]}{c_{nj}}\right)}, j = \overline{1, l}. \quad (4.34)$$

Шаг 4. Проверка критерия остановки:

если $\sqrt{(\alpha^{(j)}(s) - \alpha^{(j)}(s-1))^2} < \delta_1$ или $\sum_{j=1}^l \sqrt{(x_j(s) - x_j(s-1))^2} < \delta_2$, где δ_1 и δ_2

некоторые заданные положительные значения, то алгоритм останавливается, иначе назначаем $s=s+1$ и переходим к шагу 1.

В качестве параметра γ предлагается использовать $\gamma = \frac{1}{s}$, где s – шаг рекуррентной процедуры (4.26).

4.4. Численный анализ алгоритма синтеза и оптимизации комбинированной модели гидравлической сети

Численное исследование представленных алгоритмов проведем при следующих исходных параметрах:

- разброс выборки от начального состояния $A = 25\%$ (из соотношения (4.20));
- уровни шума $S \in \{5\%, 50\%, 100\%\}$ (из соотношения (4.21));
- параметр сдвига $B = 0.5$, соответствует случаю несмещенных выборок;
- объем обучающих выборок $n \in \{25, 50, 100\}$.

В качестве критерия качества идентификации принимали евклидовую норму отклонения найденного решения от истинного:

$$W_n = \sum_{j=1}^l \sqrt{|x_{nj} - x_j|^2}, \quad (4.35)$$

где x_{nj} – оценка соответствующего компонента вектора выходных величин, а x_j – истинное решение для модельного примера (4.19).

Результаты идентификации для базового алгоритма идентификации представлены в таблице 4.1 [6], где приведена ошибка идентификации W для разного объема выборки n и амплитуды помехи S в выборочных значениях.

Таблица 4.1 – Результаты расчета ошибки идентификации

$S = 5\%$			
n	25	50	100
W_n	0,09636	0,07330	0,05282
$S = 10\%$			
n	25	50	100
W_n	0,17085	0,13315	0,08306
$S = 25\%$			
n	25	50	100
W_n	0,34195	0,29205	0,22395

С увеличением объема обучающей выборки точность идентификации увеличивается, что демонстрирует сходимость алгоритма. Наличие помехи в каналах измерения негативно сказывается на работе соответствующих оценок. В целом по ряду экспериментов была установлена достаточно высокая точность при относительно небольших объемах обучающих выборок и устойчивость к шуму, вплоть до достаточно больших значений помехи.

В таблице 4.2 [24] приведены результаты расчета времени работы представленного непараметрического алгоритма в сравнении с ММПП. Так как алгоритм относится к стохастическим, проводилось усреднение показателя времени его работы по многим опытам. Усреднение осуществлялось по 100 реализациям вычислительного эксперимента.

Таблица 4.2 – Результаты сравнения времени расчета

Метод	Время расчета, с.
ММПП	0,531
Непараметрический алгоритм оценки решения	0,024

Данные, приведенные в таблице, показывают, что скорость отыскания оценки решения непараметрическим алгоритмом оценки решения в среднем на порядок выше, чем у модифицированного метода последовательных приближений.

Результаты численного исследования алгоритма идентификации с одновременной оценкой для разного уровня случайных помех в зависимости от такта s рекуррентной процедуры идентификации приведены ниже на графиках. По той причине, что графики, отображающие рекуррентные процедуры оценки параметров схожи, то в работе приведены графики оценки параметра лишь для одного (первого) параметра гидравлического сопротивления, соответствующего восьмому уравнению системы (4.19).

На рисунке 4.5 изображен график оценки параметра α_1 в зависимости от такта s рекуррентной процедуры идентификации при уровне случайных помех в обучающей выборке $S = 5\%$.

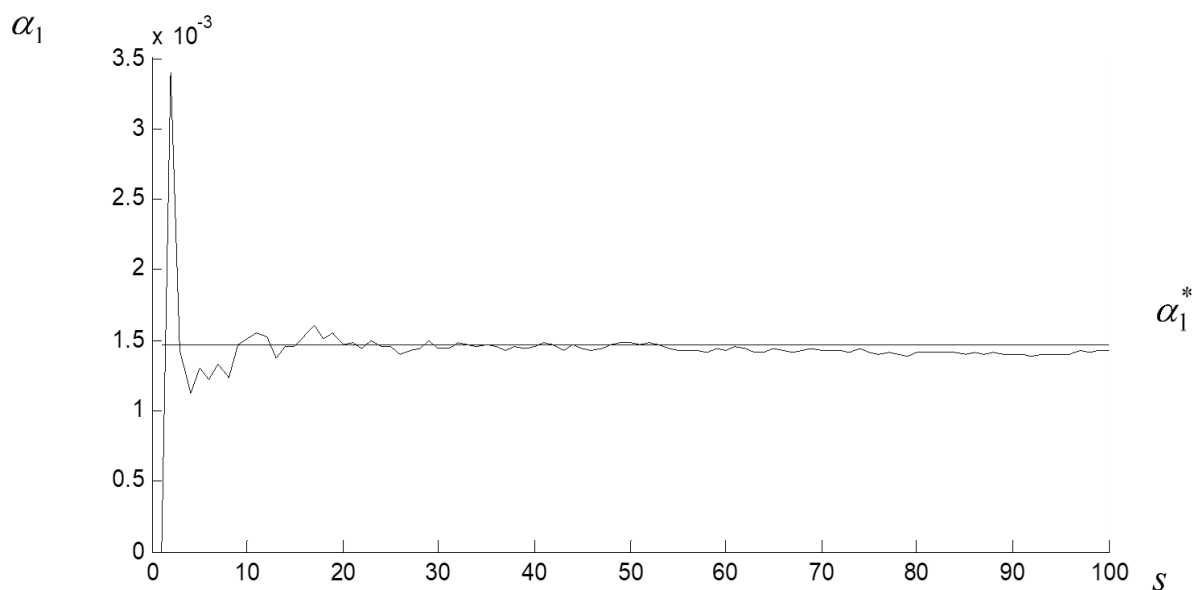


Рисунок 4.5. Оценка параметра гидравлического сопротивления α_1 при $S = 5\%$

На рисунке приняты следующие обозначения: α_1 – оценка параметра; α_1^* – истинное значение параметра; s – номер шага итерации рекуррентной процедуры оценивания параметра.

На рисунке 4.6 изображен аналогичный график для уровня случайных помех в обучающей выборке $S = 10\%$.

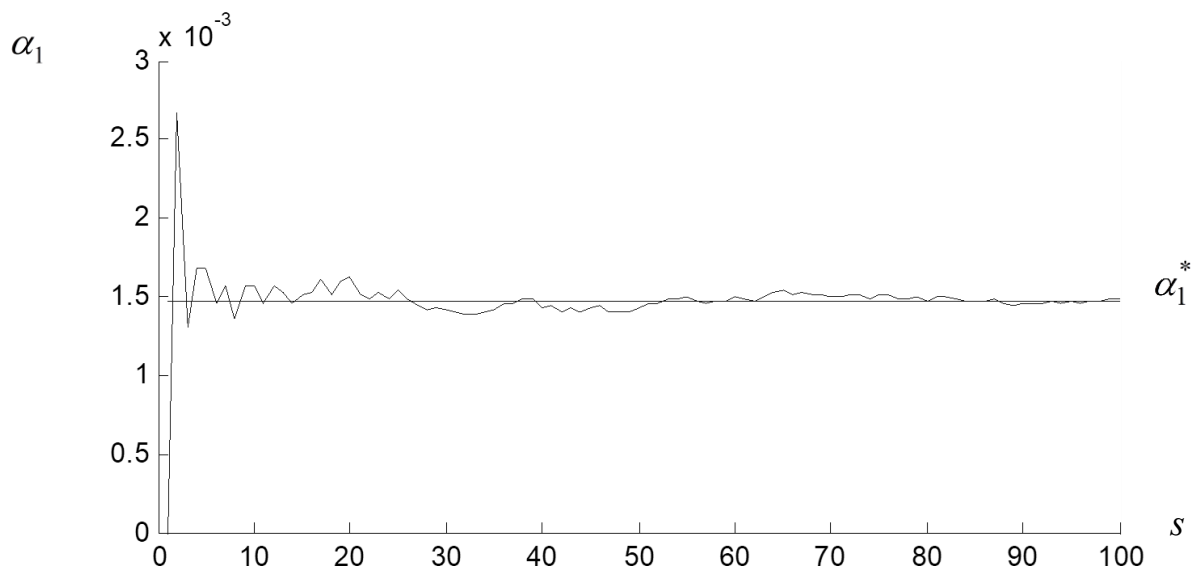


Рисунок 4.6. Оценка параметра гидравлического сопротивления α_1 при $S = 10\%$

Аналогично, на рисунке 4.7 изображен график для уровня случайных помех в обучающей выборке $S = 25\%$.

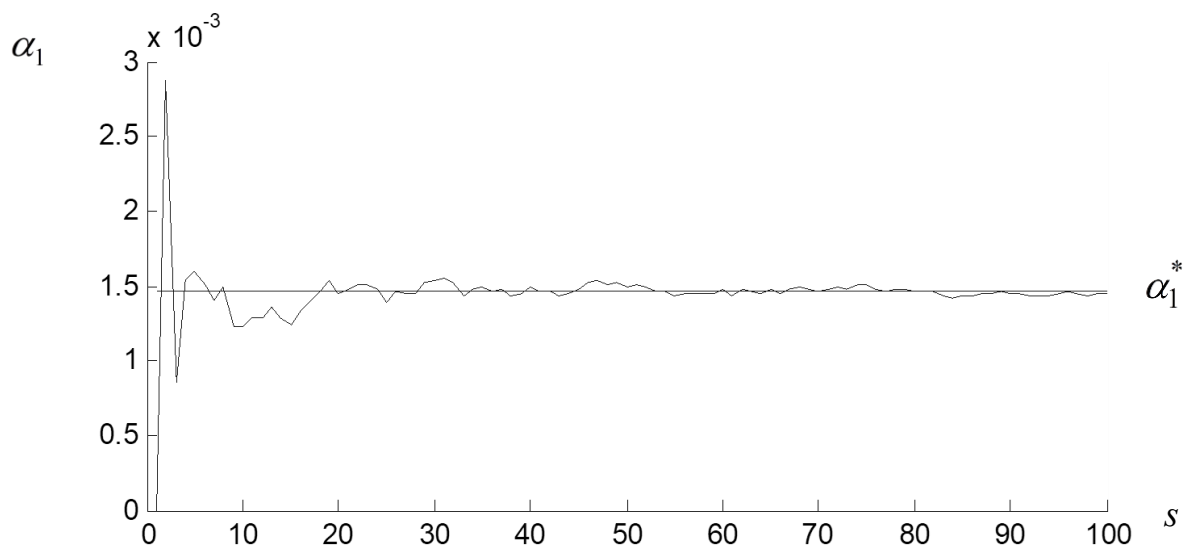


Рисунок 4.7. Оценка параметра гидравлического сопротивления α_1 при $S = 25\%$

Результаты численного моделирования (рисунки 4.5 - 4.7) показывают, что оценка параметра α_1 в результате рекуррентной процедуры стремится к своему истинному значению. Сравнение результатов для экспериментов, в которых использовали обучающие выборки с различными уровнями разброса относительно среднего значения, указывает на высокую помехоустойчивость алгоритма оценки параметров.

Ниже на графиках представлены зависимости невязки ε_8 для восьмого уравнения системы (4.19) от шага s итерационной процедуры идентификации.

На рисунке 4.8 изображен график зависимости невязки ε_8 от такта s рекуррентной процедуры идентификации при уровне случайных помех в обучающей выборке $S = 5\%$.

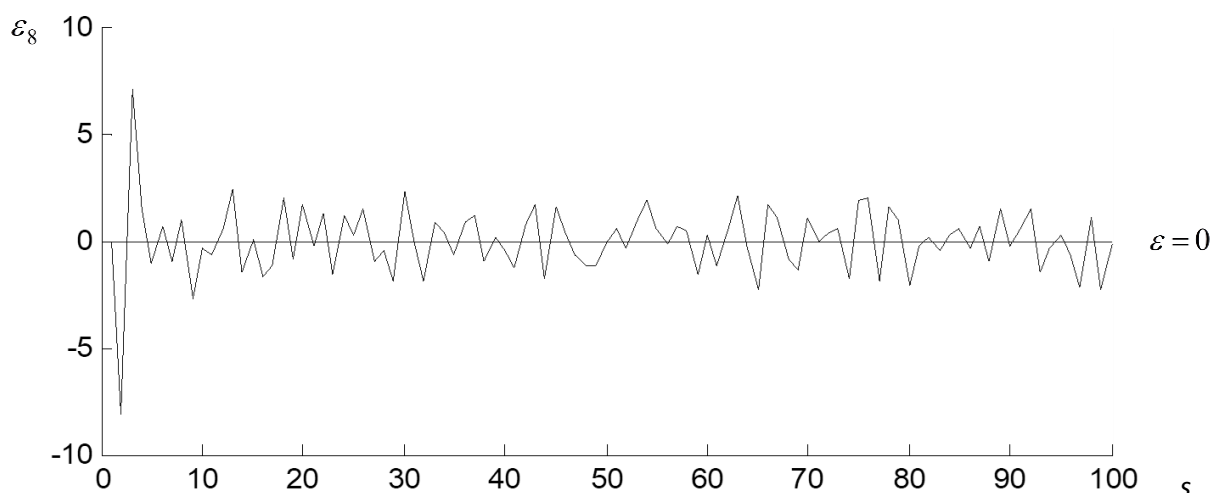


Рисунок 4.8. Невязка ε_8 для восьмого уравнения при $S = 5\%$

На рисунке 4.9 изображен график зависимости невязки ε_8 в зависимости от такта s рекуррентной процедуры идентификации при уровне случайных помех в обучающей выборке $S = 10\%$.

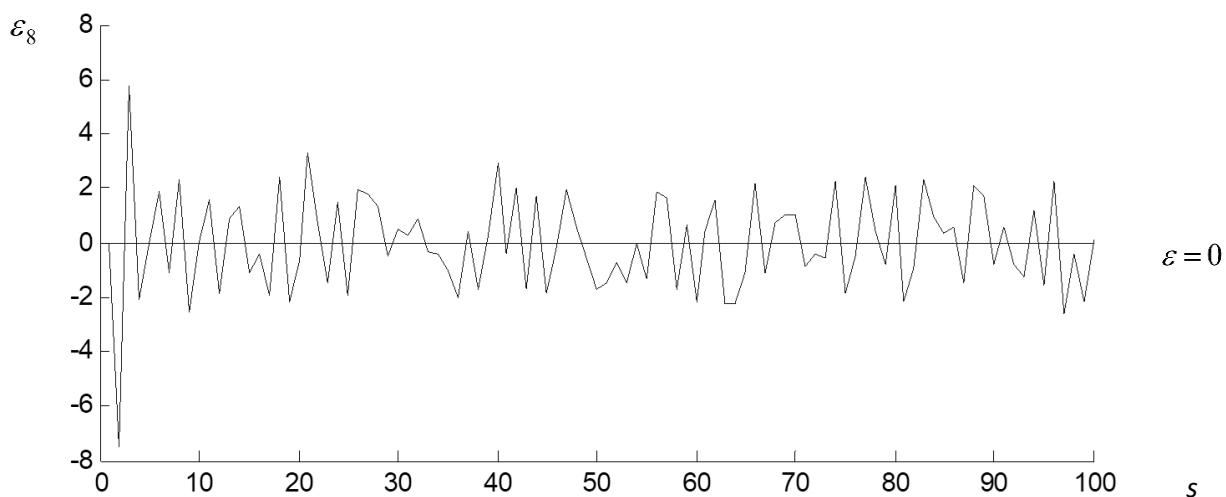


Рисунок 4.9. Невязка ε_8 для восьмого уравнения при $S = 10\%$

На рисунке 4.10 изображен график зависимости невязки ε_8 в зависимости от такта s рекуррентной процедуры идентификации при уровне случайных помех в обучающей выборке $S = 25\%$.

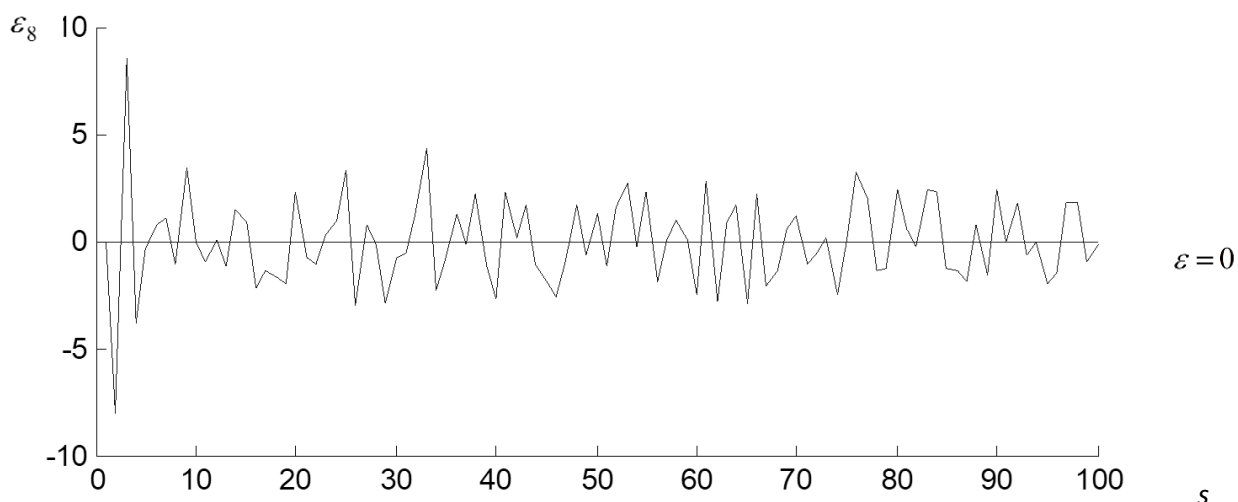


Рисунок 4.10. Невязка ε_8 для восьмого уравнения при $S = 25\%$

На основании результатов численного моделирования, представленных на рисунках 4.8 – 4.10, можно сделать вывод о том, что в ходе итерационной процедуры идентификации невязки ε_8 стремятся к нулю. Значение невязок, начиная с пятого такта рекуррентного алгоритма, остаются примерно на одном уровне. Наличие шума негативно сказывается на скорости сходимости алгоритма.

Таким образом, показана эффективность алгоритма оценки решения системы уравнений, составленных в соответствии с законами Кирхгоффа для гидравлических сетей на приведенном модельном примере.

Выводы по главе 4

В главе представлен алгоритм решения задачи синтеза алгоритма идентификации многосвязной гидравлической сети при установившемся режиме ее функционирования. Модель представляла собой систему неявных алгебраических уравнений, составленную в соответствии с законами Кирхгоффа для гидравлической сети. Часть уравнений было задано точно, другая часть представляла собой уравнения с известными, либо неизвестными параметрами.

Алгоритм протестирован в ходе численного эксперимента на примере трехконтурной нефтепроводной сети. Задача решалась с применением непараметрического алгоритма оценки выходных переменных модели. Кроме базового алгоритма оценки выходных переменных объекта, рассмотрена его модификация с одновременной оценкой параметров гидравлических сопротивлений участков нефтепровода. Показана высокая точность алгоритма идентификации и устойчивость к шуму, вплоть до высоких значений уровня случайных помех в обучающей выборке.

Нефтепроводные сети оснащены измерительной аппаратурой, подверженной влиянию неконтролируемых случайных воздействий, аддитивной и мультипликативной помех, имеющей систематическую погрешность измерений. Предложенные алгоритмы обладают высокой помехоустойчивостью вплоть до достаточно больших значений помех.

Применение предложенного алгоритма идентификации к решению прямой и обратной задач моделирования установившихся режимов работы нефтепроводов позволит повысить такие параметры математических моделей, как скорость получаемого экспресс-прогноза технологических параметров и нечувствительность к помехам. Увеличение скорости работы предложенного алгоритма по сравнению с аналогами позволяет расширить объем расчетов технологических режимов работы нефтепровода, что, в свою очередь, способно повысить надежность его эксплуатации.

Глава 5. Прогноз и коррекция погрешностей показаний датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода

5.1. Гибридные модели

Одним из важнейших этапов решения задач идентификации является выбор алгоритма оценивания оператора объекта. Этот этап осуществляется в ходе процедуры поиска соответствия между исходной априорной информацией и имеющимся в арсенале исследователя множеством алгоритмов идентификации. Как правило, среди доступных алгоритмов идентификации нет «идеальных», таких, которые позволяют в полной мере использовать всю имеющуюся априорную информацию и обеспечить высокое качество получаемого результата.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является разработка и совершенствование *гибридных алгоритмов идентификации* [113], [115], позволяющих в процессе идентификации дополнять априорную информацию об исследуемом объекте (процессе) D_p , путем привлечения текущей информации, содержащейся в экспериментальных (измеренных) данных D_s . Таким образом, гибридный подход к идентификации в полной мере соответствует сути *адаптивной методологии* в построении моделей объектов.

Гибридные модели позволяют в одной общей модели объединить различные по типу алгоритмы, функционирование которых определяется уровнем априорной информации (как правило, параметрические и непараметрические алгоритмы). В некотором смысле гибридные модели способны решать подмножество задач идентификации, соответствующих уровню комбинированной априорной неопределенности.

Дадим более подробное описание гибридных моделей. Пусть оператор, описывающий преобразование входного воздействия на объект в выходное, записывается следующим образом: $x(t) = A(u(t))$, где $u(t)$ - входное

воздействие объекта, $x(t)$ - выходной процесс, отклик на входное воздействие. В общем случае гибридные алгоритмы идентификации можно представить в виде соотношения [111]:

$$\hat{x}(t) = Q(\{\hat{A}(u(t))\}, \{\hat{G}(t)\}), \quad (5.1)$$

где оператор $Q(\cdot)$ задает связь между параметрической аппроксимацией $\hat{A}(u(t))$ оператора объекта и непараметрической оценкой $\hat{G}(t)$ функции рассогласования между $\hat{A}(u(t))$ и $A(u(t))$. Выбор конкретного вида параметрической аппроксимации осуществляется с использованием априорных сведений D_p . Оценка $\hat{G}(t)$ обеспечивает учет текущей информации D_s , которая несёт сведения о локальных особенностях оцениваемого оператора $A(u(t))$.

Пусть имеется выборка наблюдений состояний объекта D_s : $V = \{u(t), x(t), t = \overline{1, n}\}$ и известны сведения (либо принимается гипотеза) D_p : $\hat{A}(u(t), \alpha)$ о виде преобразования $A(u(t))$ с точностью до набора параметров α . Решение задачи идентификации предусматривает на первом этапе исследование аппроксимационных свойств параметрической модели $x(t) = \hat{A}(u(t))$ путем вычислительного эксперимента на статистических данных V . Далее формируется рабочая выборка для невязок между $\hat{A}(u(t))$ и $A(u(t))$: $V_I = \{u(t), q(t), t = \overline{1, n}\}$, по которой восстанавливается $q(t)$: $q(t) = q(\hat{A}(u(t), \alpha), A(u(t)))$. Оценивание функции невязки $q(t)$ производится с помощью непараметрической процедуры. Гибридная модель формируется как сочетание $\hat{A}(u(t))$ и $\hat{q}(t)$, зависящее от введенного преобразования $q(\cdot)$ [111].

Примем следующие два типа преобразования, формирующие функцию невязки: аддитивную $q_{\Sigma}(t) = A(u(t)) - \hat{A}(u(t))$ и мультипликативную $q_{\Pi}(t) = A(u(t)) / \hat{A}(u(t))$. Тогда гибридная модель запишется в одном из двух представлений:

$$x_{\Sigma}(t) = \hat{A}(u(t), \alpha) + \hat{q}(t), \quad (5.2)$$

или

$$x_{\Pi}(t) = \hat{A}(u(t), \alpha) \cdot \hat{q}(t), \quad (5.3)$$

Построение параметрической модели $x(t) = \hat{A}(u(t))$ может производиться с использованием достаточно хорошо разработанных методов параметрической идентификации на основании априорных сведений о структуре оператора $\hat{A}(u(t))$.

Преобразование $\hat{q}(t)$ восстанавливается с помощью непараметрической оценки регрессии [111]:

$$\hat{q}(t) = \frac{\sum_{t=1}^n q[t] \prod_{k=1}^m \Phi\left(\frac{u_k - u_k[t]}{c_n}\right)}{\sum_{t=1}^n \prod_{k=1}^m \Phi\left(\frac{u_k - u_k[t]}{c_n}\right)}, \quad (5.4)$$

где значения $q[t]$, $t = \overline{1, n}$ вычисляются на основании исходной выборки $V = \{u(t), x(t), t = \overline{1, n}\}$ по следующим формулам:

$$q_{\Sigma}[t] = x(t) - \hat{A}(u(t), \alpha), \quad (5.5)$$

$$q_{\Pi}[t] = \frac{x(t)}{\hat{A}(u(t), \alpha)}, t = \overline{1, n}. \quad (5.6)$$

Ядерные функции $\Phi(z)$ – симметричные, неотрицательные, имеющие свойства плотности на отрезке $\{z = u - v : |z| < c_n\}$, дельтаобразные при $n \rightarrow \infty$ функции, удовлетворяющие условиям сходимости (для скалярного z) [127]:

$$\Phi(z) < \infty, \quad \frac{1}{c_n} \int_{z \in \Omega(z)} \Phi\left(\frac{z}{c_n}\right) dx = 1, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{c_n} \Phi\left(\frac{z}{c_n}\right) = \delta(u - v), \quad (5.7)$$

где $\delta(\cdot)$ – функция Дирака; c_n – параметр размытости (коэффициент размытости), удовлетворяющий условиям [127]:

$$c_n > 0, \quad n = 1, 2, \dots; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} n c_n = \infty. \quad (5.8)$$

Рассматриваемый класс алгоритмов (5.1) имеет множество дополнительных модификаций, базирующихся на введении различных алгоритмов вычисления невязки. В частности, существуют алгоритмы с

невязками типа арктангенса и экспоненты. Например, если невязка задана соотношениями:

$$\begin{aligned} q_{tg}(t) &= \arctg(A(u(t)) - \hat{A}(u(t), \alpha)), \\ q_{ln}(t) &= \exp(A(u(t)) - \hat{A}(u(t), \alpha)), \end{aligned} \quad (5.9)$$

тогда гибридная модель запишется в виде:

$$\begin{aligned} x_{tg}(t) &= \hat{A}(u(t), \alpha) + tg(\hat{q}(t)), \\ x_{ln}(t) &= \hat{A}(u(t), \alpha) + \ln(\hat{q}(t)). \end{aligned} \quad (5.10)$$

Большое разнообразие методов расчета функции невязки порождает проблему неопределенности в обосновании выбора той или иной разновидности гибридных моделей. Для невязки типа сумма установлена высокая эффективность при наличии аддитивных помех, для невязки типа произведение – при наличии мультипликативных помех [111].

При отсутствии априорных сведений о характере случайных воздействий целесообразно применение *коллективных (ансамблевых) методов оценивания* [111]. Теория и практика использования коллективов (ансамблей) формируется в рамках теории интеллектуального анализа данных [252], рассматривалась, в том числе, в работах [21], [121], [18], [122], [257], [258] для решения различных практических задач.

Один из возможных вариантов построения коллектива моделей представляет собой линейную комбинацию моделей:

$$x(t) = \lambda \cdot x_{\Pi}(t) + (1 - \lambda) \cdot x_{\Sigma}(t), \quad \alpha \in [0,1], \quad (5.11)$$

где $x_{\Pi}(t)$ и $x_{\Sigma}(t)$ – гибридные модели с невязкой типа произведение и сумма соответственно, λ – вес модели $x_{\Pi}(t)$ в коллективе.

Следует отметить, что рассмотренные выше модели обладают свойствами асимптотической несмещенности, состоятельности и сходимости в среднеквадратическом [111].

Коллективы вида (5.11) позволяют наиболее полно учитывать исходную априорную информацию и нивелировать проблему неопределенности выбора

функции невязки. Однако использование таких коллективов сопровождается некоторыми вычислительными трудностями, так как весовой параметр λ в соответствующих моделях необходимо оптимизировать в соответствии с некоторым критерием качества.

В ходе исследования аппроксимационных свойств гибридных моделей (5.2) и (5.3) в [111], [113], [115] было установлено, что модели с функцией невязки типа отношение проявляют большую помехоустойчивость в условиях больших неточностей в нахождении параметрической модели $\hat{A}(u(t), \alpha)$. В противном случае, если параметрическое описание объекта известно с точностью до порядка, то предпочтительнее использовать гибридную модель с функцией невязки типа разность.

Гибридные модели во многих случаях являются более эффективными по сравнению с непараметрической регрессией и менее чувствительными к изменению объема обучающих выборок, что объясняется учетом дополнительной информации о виде восстанавливаемой зависимости. Коллективы гибридных моделей обладают преимуществом при больших уровнях зашумленности исходных данных и значениях функции невязки, что особо проявляется при малых и ограниченных объемах обучающих выборок. Кроме отмеченных выше преимуществ гибридных моделей следует отметить снижение требований по точности оценки параметра α при построении параметрической модели $\hat{A}(u(t), \alpha)$ исследуемого объекта.

5.2. Постановка задачи коррекции погрешностей показаний датчиков давления

Главной характеристикой любого измерительного устройства (датчика) является *погрешность измерения* контролируемого параметра [172]. Погрешность измерения отображает величину расхождения между результатом измерения и реальным значением измеряемого параметра. Производители измерительных устройств обычно указывают характеристики погрешностей в

техническом паспорте прибора. Однако, на практике, величина погрешности часто не соответствует заявленным данным, а иногда и вовсе неизвестна. Более того, в процессе эксплуатации прибора величина погрешности постоянно меняется. Причинами изменения характеристик погрешностей могут стать изменение условий эксплуатации (внешние факторы), дрейф физических параметров самого датчика (внутренние факторы), возмущения в каналах связи датчика с регистрирующей аппаратурой, частичный или полный выход из строя датчика и так далее. В связи с этим, разработка соответствующих алгоритмов коррекции погрешностей является актуальной задачей, причем очевидна необходимость построения адаптивных подходов, функционирующих в условиях неопределенности и изменчивости окружающей среды.

В научной и справочной литературе [50], [61], [79] предлагаются различные подходы к коррекции погрешностей измерений датчиков. Один из них состоит в конструктивном изменении и оптимизации устройства датчика (оптимизация свойств чувствительного элемента, топологии, конструкции корпуса и т. д.). Другой подход заключается во включении в структуру прибора дополнительных пассивных и активных элементов, обеспечивающих необходимую коррекцию. Третий предусматривает разработку алгоритмических методов коррекции по математической модели (*концепция интеллектуального датчика*). Именно этот подход используется в дальнейшем с целью коррекции показаний датчиков давления.

Объектом исследования в настоящей работе является магистральный нефтепровод. Современные трубопроводные сети и гидравлические системы оснащены различной измерительной аппаратурой и информационно-измерительными системами, используемыми для мониторинга и контроля технологических параметров. Давления в различных конструктивных элементах трубопровода, в том числе в его линейной части, в обязательном порядке подвергаются измерению и анализу.

Датчик давления представляет собой контрольно-измерительное устройство, состоящее из чувствительных элементов, воспринимающих

давление, и преобразователей, собранных в едином корпусе. Давление, прикладываемое к чувствительному элементу, приводит к изменению внутренних характеристик датчика, которые в итоге преобразуются в электрический сигнал. В общем случае зависимость электрического сигнала от давления не является линейной и зависит от температуры среды, в которой находится датчик. Для устранения этой нелинейности в датчиках устанавливаются специальные электронные преобразователи [79].

Наиболее общее схематическое представление датчика давления изображено на рисунке 5.1 [230].

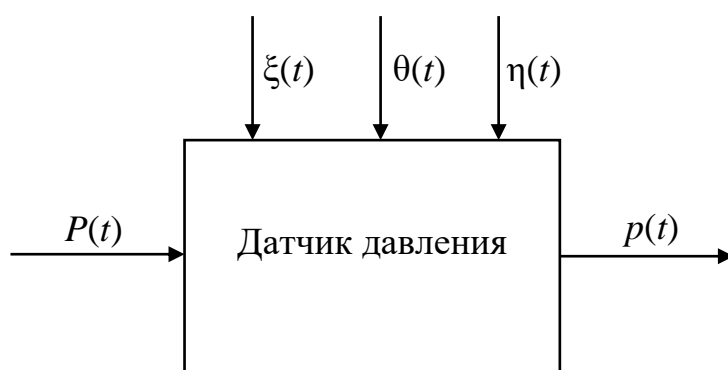


Рисунок 5.1. Представление датчика давления в качестве преобразователя входных процессов в измеренный сигнал

На рисунке 5.1 приняты следующие обозначения: величины $P(t)$, $p(t)$ представляют собой соответственно входную (давление) и выходную (электрический сигнал) переменные датчика; $\xi(t)$, $\theta(t)$, $\eta(t)$ – случайные аддитивная, мультипликативная помехи и систематическая погрешность. $\xi(t)$, $\theta(t)$ имеют нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию, $\eta(t)$ – ограниченное математическое ожидание и дисперсию. При этом связь соответствующих переменных может быть представлена следующим выражением [230]:

$$p(t) = A(P(t)) \cdot \theta(t) + \xi(t) + \eta(t), \quad (5.12)$$

где A – неизвестный оператор.

Вдоль профиля линейной части магистрального нефтепровода на определенном расстоянии друг от друга установлены датчики давления.

Расстояние между соседними датчиками не одинаковое, но обычно оно не превышает 30 км. По причинам, связанным с различием в типах, производителях датчиков, их техническим состоянием, особенностями считывания данных, измеренные значения включают в себя отличающиеся друг от друга систематические и случайные погрешности. Необходимо, пользуясь сведениями о физических закономерностях распределения давления вдоль профиля трубопровода и о взаимном расположении датчиков, на основании выборки измерений построить модель распределения давления вдоль профиля нефтепровода для определенного технологического режима его эксплуатации.

В соответствии с уравнением Бернулли [119] и др., давление на участке трубопровода с постоянным диаметром без самотечных участков при установившихся режимах работы имеет линейную зависимость от координаты профиля трубопровода. Схематично это изображено на рисунке 5.2 [230].

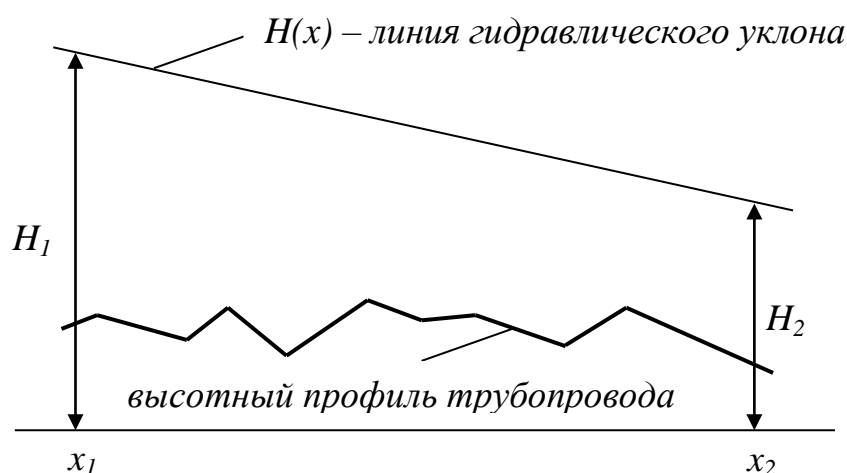


Рисунок 5.2. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

На рисунке 5.2 приняты следующие обозначения: $H_1 = p_1/\rho g + z_1$, $H_2 = p_2/\rho g + z_2$ – напоры в начальной (x_1) и конечной точке (x_2) рассматриваемого линейного участка нефтепровода. z_1, z_2 –высотные отметки нефтепровода в начальном x_1 и конечном x_2 сечениях соответственно.

Прямая, соединяющая верхние концы отрезков H_1 и H_2 , называется *линией гидравлического уклона*. Физический смысл гидравлического уклона – потеря напора на трение, приходящаяся на единицу длины трубопровода [119].

Линейность зависимости давления от координаты сечения трубопровода наблюдается в идеальном случае при постоянстве внутреннего сечения трубопровода, неизменности физических характеристик перекачиваемой нефти вдоль профиля трубопровода и т. д. В реальности распределение давлений отличается от линейного. Наличие местных сопротивлений, естественный дрейф физических характеристик нефти способствуют сдвигам, изломам, а также изменению наклона линии гидравлического уклона. Однако близость гидроуклона к линейному виду должна быть использована как *априорная информация* при построении модели распределения давлений. Кроме этого необходимо учитывать *текущую информацию*, представленную в выборках измерений давлений вдоль профиля нефтепровода. Прогноз показаний датчиков сводится к решению *задачи идентификации* [219]. Применительно к системам трубопроводного транспорта, задача идентификации рассматривалась автором в [9], [10].

Применяемые в настоящее время алгоритмы идентификации зачастую ограничены использованием в них исключительно параметрического подхода. Данные обрабатываются с применением моделей с известной параметрической структурой и последующей оценкой параметров. Качество идентификации с использованием таких процедур в большой степени зависит от правильности выбора параметрической структуры модели. Модели, построенные в рамках непараметрического подхода [127], не используют в полной мере имеющуюся априорную информацию. В связи с этим для решения поставленной задачи предлагается использовать *гибридные модели* [111], как средство наиболее полного учета как информации о структуре модели, процессе измерения и характеристиках измеряемых величин, так и закономерностей, содержащихся непосредственно в выборках измеренных величин.

5.3 Алгоритм коррекции показаний датчиков на основе адаптивных гибридных моделей

Исходные данные для построения модели распределения давления в нефтепроводе представляют собой сведения о параметрическом описании процесса $\{D_p: p(x) = ax + b\}$, что соответствует идеальной линейной модели зависимости давления от координаты сечения трубопровода, а также выборку наблюдений показаний датчиков давления $D_s: V = \{p_i[t]\}$, расположенных вдоль линии профиля нефтепровода. Индекс i указывает на порядковый номер датчика, $i = \overline{1, k}$; индекс t определяет номера тактов дискретного времени, в которых происходили измерения давления, $t = \overline{1, n}$.

Для построения модели использовались данные реального трубопроводного объекта, в котором протяженность участка составляет $L = 907,8$ км. Число линейных участков $T = 5$. Количество датчиков давления $k = 87$, объем выборки $n = 1440$ измерений.

На предварительном этапе необходимо проведение предварительной статистической обработки данных с целью устранения так называемых *выбросов* или грубых погрешностей в измерениях (*цензурирование выборки*). Решению данной задачи посвящено множество работ, в частности, применительно к задаче идентификации [94]. Для проведения процедуры цензурирования рассчитаем среднее m_i и среднеквадратическое отклонение σ_i для каждого i -го датчика давления:

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n p_i(t), \quad (5.13)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (p_i(t) - m_i)^2}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (5.14)$$

Далее, удалим из выборки показания датчиков, для которых среднеквадратическое отклонение превышает 3σ , руководствуясь известной рекомендацией прикладной математической статистики [63]. Таким образом, исключим из выборки грубые погрешности измерений.

Дальнейшим шагом будет исключение из выборки данных, соответствующих неработающим датчикам давления. Для этого зададим некоторое положительное число Δp , которое определяется технологическим регламентом и отражает возможную величину разницы давлений соседних датчиков. Превышение измеренной величины давления заданного значения будет свидетельствовать о неисправности или выходе из строя датчика, либо о другой возникшей неисправности на данном участке нефтепровода. Данное условие можно выразить соотношением:

$$|p_i - p_{i+1}| \leq \Delta p, i = \overline{1, k}. \quad (5.15)$$

При этом Δp не учитывается для датчиков, предшествующих нефтеперекачивающей станции (НПС), так как на НПС происходит резкое нагнетание давления, что является спецификой данных участков нефтепровода.

После этого проведем процедуру усреднения выборки D_s по количеству измерений:

$$p(x_i) = m_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n p_i(t), i = \overline{1, k}. \quad (5.16)$$

Таким образом, исходная выборка D_s преобразуется в новую рабочую выборку D_s : $V = \{x_i, p(x_i)\}$, $i = \overline{1, k}$, в которой x_i представляют собой координаты линейной части профиля нефтепровода, в которых установлены соответствующие датчики давления.

В качестве моделей процесса распределения давления будем использовать модели (5.2), (5.3) и (5.11). Проведем сравнительный анализ моделей. Алгоритм построения моделей (5.2) и (5.3) предлагается в следующем виде [2], [41]:

1. Оценка параметров $\alpha = (a, b)$ линейной модели $p(x) = ax + b$ с помощью метода наименьших квадратов по данным D_s ;
2. Расчет невязок $q(x)$ по формулам (5.5), (5.6);
3. Непараметрическое оценивание функции невязки $\hat{q}(x)$ в соответствии с выражением (5.4);

4. Суммирование (для модели (5.2)) и перемножение (для модели (5.3)) полученных параметрических и непараметрических моделей.

Данную процедуру повторяем для каждого линейного участка нефтепровода. Модель (5.11) формируется как комбинация моделей (5.2) и (5.3).

Настройка весовых параметров λ в модели (5.11) производилась методом наилучшей пробы, то есть на заданном диапазоне значений параметра задавалась сетка с некоторым шагом, далее вычислялось значение среднеквадратического критерия для каждой точки, после чего выбиралось значение параметра, соответствующее наименьшей величине критерия. Настройка параметров размытости c_n в непараметрических оценках (5.4) осуществлялась методом скользящего экзамена. Критерии оптимизации по параметрам λ и c_n имеют следующий вид:

$$\lambda = \arg \min_{\lambda} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sqrt{(p(x_i) - \lambda p_{i,\Pi}(x_i) - (1-\lambda) p_{i,\Sigma}(x_i))^2}. \quad (5.17)$$

$$c_n = \arg \min_{c_n} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sqrt{(\hat{q}(x_i, c_n) - q(x_i))^2}. \quad (5.18)$$

В итоге, гибридные модели (5.2), (5.3) и коллектив (5.11) соответственно, принимают вид [2]:

$$p_{i,\Sigma}(x) = a_i x + b_i + \hat{q}_i(x), x = \overline{X_i, X_{i+1} - 1}, i = \overline{1, T}, \quad (5.19)$$

$$p_{i,\Pi}(x) = (a_i x + b_i) \cdot \hat{q}_i(x), x = \overline{X_i, X_{i+1} - 1}, i = \overline{1, T}, \quad (5.20)$$

$$p_{i,\lambda}(x) = \lambda \cdot p_{i,\Pi}(x) + (1-\lambda) \cdot p_{i,\Sigma}(x), x = \overline{X_i, X_{i+1} - 1}, i = \overline{1, T}, \quad (5.21)$$

где $p(x)$ – давление в точке x , $\alpha_i = (a_i, b_i)$, $i = \overline{1, T}$ – параметры линейной модели i -го линейного участка нефтепровода, $\hat{q}_i(x)$, $i = \overline{1, T}$ – непараметрические оценки функции невязки. Координаты X_i , $i = \overline{1, T}$ соответствуют датчикам давления, расположенным на нефтеперекачивающей станции.

В качестве критерия качества идентификации использовался среднеквадратический критерий:

$$W = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sqrt{(p(x_i) - p_{i,m}(x_i))^2}, \quad (5.22)$$

где n – объём выборки, $p(x_i)$, $i = \overline{1, k}$ – элементы тестовой выборки, $p_{i,m}(x_i)$ – вычисленное на основании модели значение давления.

5.4 Результаты исследования алгоритмов коррекции и их анализ

Результаты построения моделей, значения параметров и среднеквадратической ошибки соответствующих моделей приведены в сводной таблице 5.1 [2].

Таблица 5.1 – Параметры соответствующих гибридных и коллективных моделей и значения среднеквадратичной ошибки идентификации

Параметр \ Тип модели	a_i	b_i	λ_i	W
Непараметрическая регрессия (I)	–	–	–	6.823e-04
Параметрическая линейная модель (II)	$a_1=-0.1741$ $a_2=-0.1819$ $a_3=-0.1821$ $a_4=-0.1721$ $a_5=-0.1864$	$b_1=45.40$ $b_2=68.33$ $b_3=99.71$ $b_4=135.06$ $b_5=176.06$	–	19.8128
Гибридная с аддитивной невязкой (III)	$a_1=-0.1741$ $a_2=-0.1819$ $a_3=-0.1821$ $a_4=-0.1721$ $a_5=-0.1864$	$b_1=45.40$ $b_2=68.33$ $b_3=99.71$ $b_4=135.06$ $b_5=176.06$	–	1.486e-04

Окончание таблицы 5.1

Гибридная модель с мультипликативной невязкой (IV)	$a_1=-0.1741$	$b_1=45.40$	—	7.859e-04
	$a_2=-0.1819$	$b_2=68.33$		
	$a_3=-0.1821$	$b_3=99.71$		
	$a_4=-0.1721$	$b_4=135.06$		
	$a_5=-0.1864$	$b_5=176.06$		
Коллектив гибридных моделей III и IV (V)	$a_1=-0.1741$	$b_1=45.40$	$\lambda_1=6.76e-05$	1.486e-04
	$a_2=-0.1819$	$b_2=68.33$	$\lambda_2=2.55e-06$	
	$a_3=-0.1821$	$b_3=99.71$	$\lambda_3=5.23e-05$	
	$a_4=-0.1721$	$b_4=135.06$	$\lambda_4=2.72e-06$	
	$a_5=-0.1864$	$b_5=176.06$	$\lambda_5=3.87e-06$	

По итогам вычисления ошибки идентификации наиболее эффективной моделью является гибридная модель с аддитивной невязкой (III). При этом величина среднеквадратической ошибки для модели (III) в несколько раз меньше, чем для непараметрической оценки регрессии (I), и на несколько порядков меньше, чем для линейной модели (II), применяемой в настоящее время на практике. Это объясняется качественно новыми свойствами гибридных моделей, обеспечивающих полноту использования априорной информации об исследуемом процессе распределения давления.

Вычисленные значения параметров λ близки к нулю, что свидетельствуют о низкой эффективности модели (IV), и, следовательно, коллективов гибридных моделей (V) при решении поставленной задачи. Ошибка идентификации для гибридной модели с аддитивной невязкой (III) меньше, чем для гибридной модели с мультипликативной невязкой (IV), что связано с отсутствием грубых погрешностей измерений в выборках (проводилось цензурирование выборки). Модели вида (IV) обладают более высокими показателями грубости (робастности) по отношению к случайным воздействиям. При относительно

малых случайных воздействиях, более эффективной является гибридная модель с аддитивной невязкой (III).

Ниже приведены графики полученных моделей. На рисунке 5.3 изображена модель процесса распределения давления в виде непараметрической регрессии.

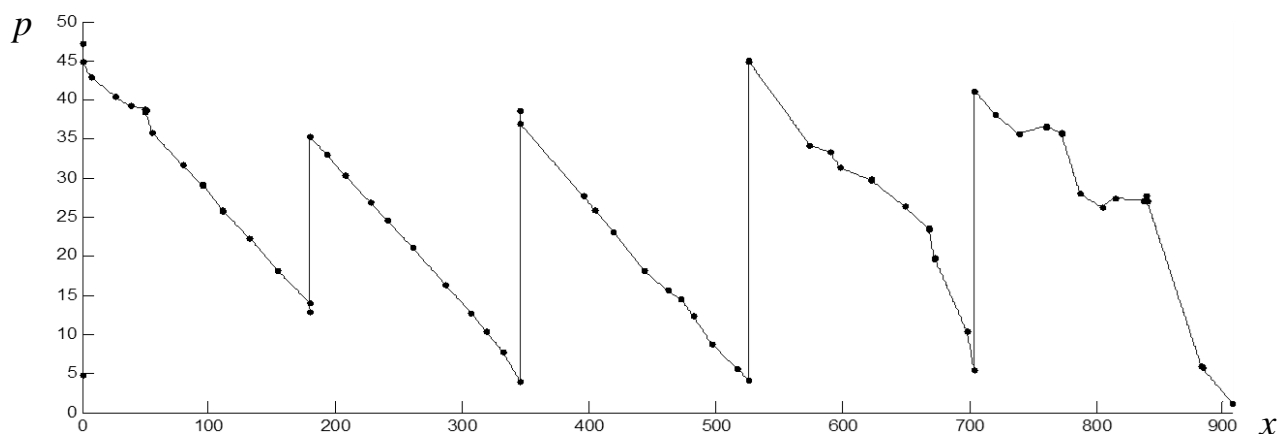


Рисунок 5.3. Непараметрическая регрессионная модель и измерения датчиков давления

Точками на графике показаны усредненные выборочные значения, сплошная линия представляет собой постоенную в результате процедуры идентификации модель.

Непараметрическая регрессия обеспечивает высокое качество идентификации по критерию среднеквадратической ошибки. Ошибка идентификации для непараметрической регрессии и для гибридной модели с мультипликативной невязкой практически идентичны, что свидетельствует о схожих аппроксимационных свойствах этих моделей.

На рисунке 5.4 изображена линейная параметрическая модель распределения давлений.

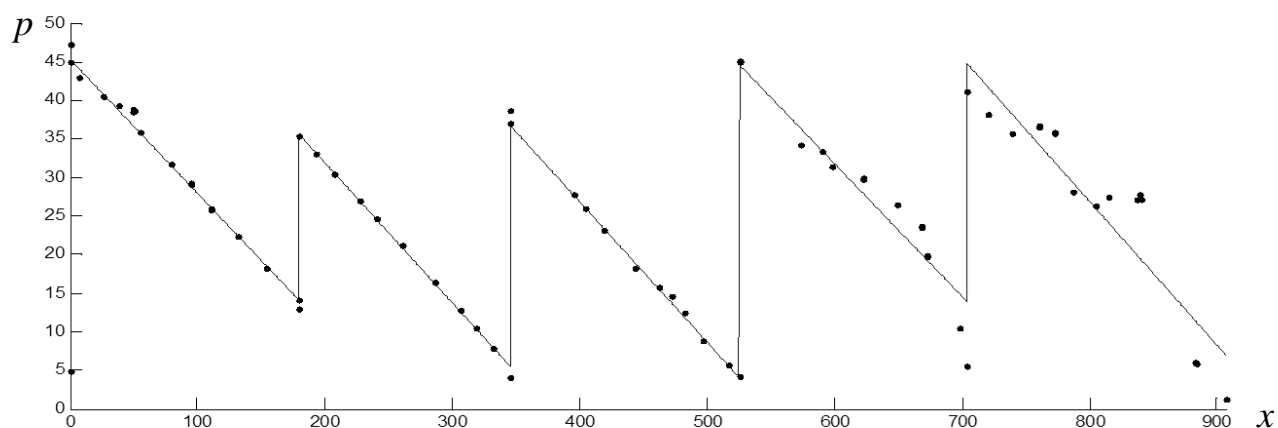


Рисунок 5.4. Линейная модель и измерения датчиков давления

На рисунке 5.4 можно видеть, что параметрическая линейная модель с достаточно высокой точностью аппроксимирует линейные участки трубопровода для которых более ярко выражен линейность распределения давления. Тем не менее, даже для этих участков ошибка идентификации больше в сравнении с непараметрической регрессией и гибридной моделью с аддитивной невязкой.

На рисунке 5.5 приведена гибридная модель с аддитивной невязкой. Данная модель обеспечивает самое высокое качество идентификации.

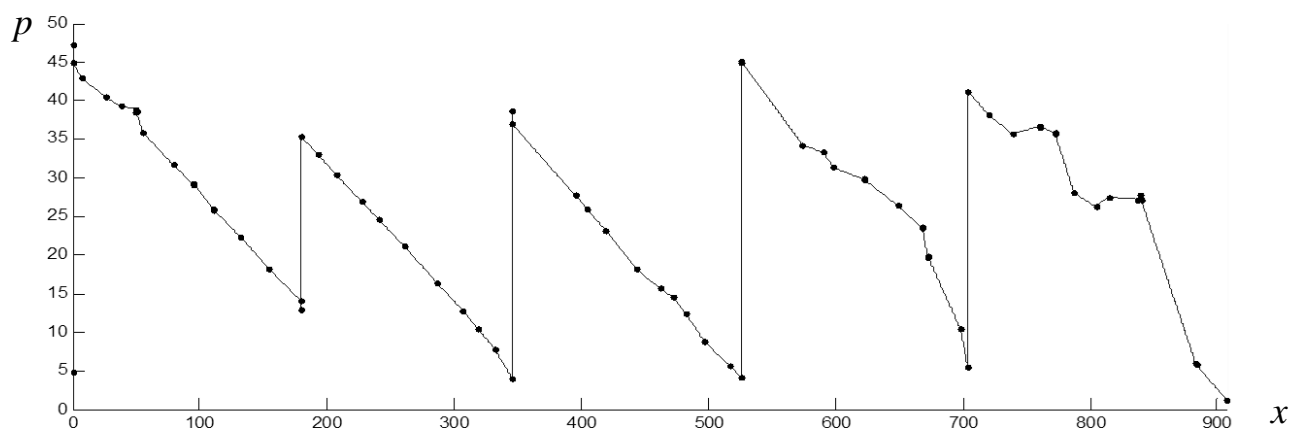


Рисунок 5.5. Гибридная модель с аддитивной невязкой и измерения датчиков давления

Гибридная модель с аддитивной невязкой показывает наибольшую эффективность в сравнении с остальными моделями, что подтверждает целесообразность применения рассмотренного подхода и соответствует результатам, полученным в ходе предыдущих исследований аппроксимационных свойств гибридных моделей.

На рисунке 5.6 приведена гибридная модель с мультипликативной невязкой.

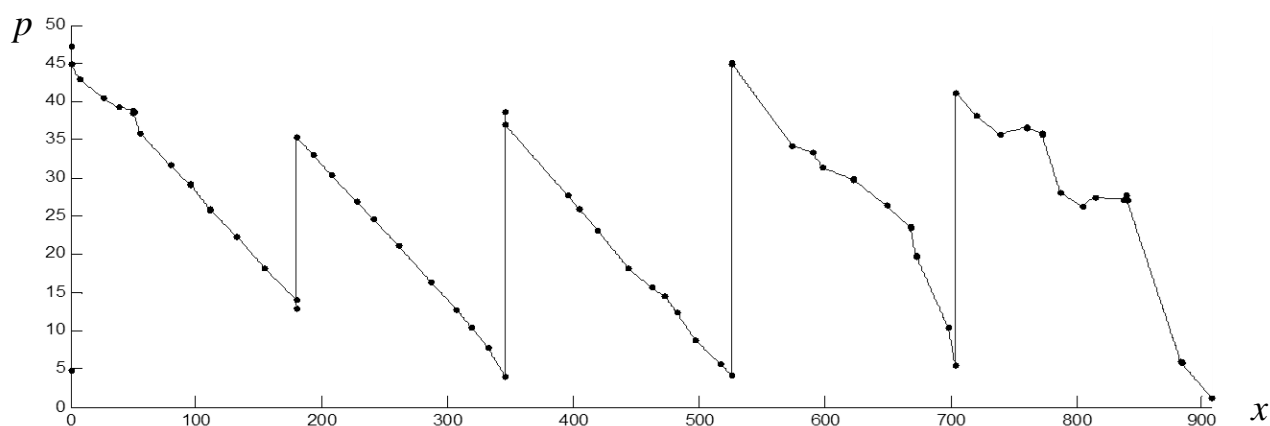


Рисунок 5.6. Гибридная модель с мультипликативной невязкой и измерения датчиков давления

Представленные графики не позволяют судить о превосходстве одной модели над другой, поэтому ниже на рисунке 5.7 приведен увеличенный график, на котором представлено сравнение моделей (I) и (III).

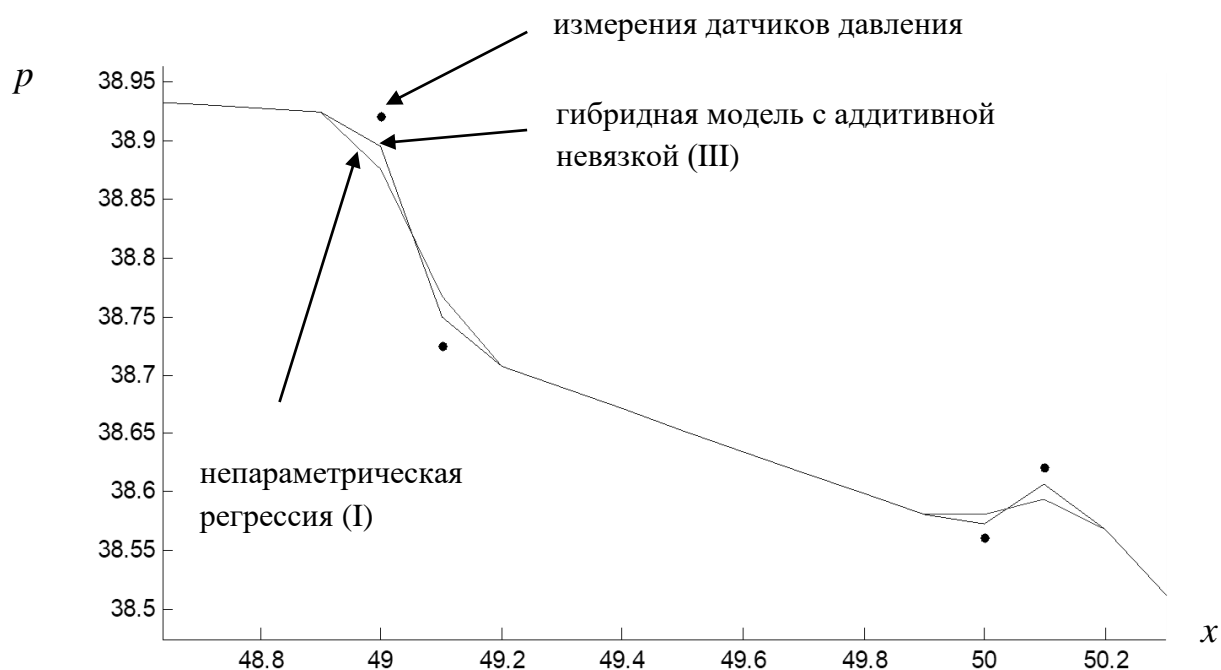


Рисунок 5.7. Сравнение непараметрической регрессии и гибридной модели с аддитивной невязкой

На рисунке 5.7 можно увидеть преимущество гибридной модели с аддитивной невязкой над непараметрической регрессией. Этот эффект объясняется учетом в полной мере как базовых априорных сведений D_p о линейности модели, так и дополнительных сведений D_s , содержащихся в выборочных данных, описывающих локальные особенности исследуемого процесса распределения давлений.

Гибридная модель с невязкой типа суммы показывает наибольшую эффективность в сравнении с остальными моделями, что подтверждает целесообразность применения рассмотренного подхода при практическом его использовании.

Выводы по главе 5

В пятой главе диссертации рассмотрен алгоритм коррекции показаний датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода с

использованием гибридных и коллективных моделей распределения давления. С применением предложенного алгоритма решена задача синтеза соответствующего программно-алгоритмического обеспечения, показана его работоспособность и эффективность для решения задач, возникающих в практике эксплуатации магистрального нефтепровода.

Предложенная алгоритмическая процедура позволяет:

1. Корректировать погрешности измерений датчиков давления на основании построенных моделей;
2. Прогнозировать показания заведомо неработающих датчиков, а также давление в промежутках между установленными датчиками;
3. Экстраполировать зависимость давлений от координаты профиля трубопровода в стационарных режимах.

Использование предложенного подхода позволяет повысить точность контроля распределения давления магистрального нефтепровода, обеспечить надежность принятия решения в системах диспетчерского управления и контроля в случае выхода из строя датчиков давления на линейной части нефтепровода.

Глава 6. Имитационное моделирование процессов в магистральном нефтепроводе

6.1. Обоснование использования имитационного подхода в задаче моделирования процессов в магистральном нефтепроводе

Методология *имитационного моделирования* [181], [216] наряду с описанными ранее подходами к построению моделей (идентификационный, адаптивный и т.д.), предлагает ещё один способ преодоления неопределенности в процессе построения модели объекта. При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени. Имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени [216]. Имитационные модели применяются при отсутствии аналитических моделей объекта, либо в случае, когда не разработаны методы решения полученной модели. Нередко имитационные модели реализуются с применением специальных компьютерных программ – симуляторов.

Привлечение технологии имитационного моделирования процессов в магистральном нефтепроводе обусловлено еще и тем фактом, что зачастую предприятия, эксплуатирующие нефтепровод, не обладают целостными и объективными данными измерения параметров технологического процесса. Сбор данных о технологических параметрах производится с разными целями разными подразделениями (службами) компании - эксплуатанта магистрального нефтепровода [152].

Среди систем сбора данных можно выделить:

- систему диспетчерского контроля и управления (СДКУ), осуществляющую контроль и управление технологическими режимами;

- систему измерения количества и показателей качества нефти (СИКН), основное назначение которой – контроль над выполнением целевых показателей по объемам перекачки нефти и её качественным характеристикам;
- вспомогательные системы для обеспечения пожарной безопасности, электрохимической защиты, предотвращения утечек и т.д.

Проблемой на сегодняшний день является несогласованность систем различного назначения и подчиненности различным структурным подразделениям. Данные, собираемые и хранимые системами зачастую невозможно использовать в ретроспективе.

Наибольшее значение предается данным, имеющим решающее значение в выполнении целевых показателей, таких как объемы перекачки нефти, расход энергоресурсов. Также осуществляется мониторинг параметров, влияющих на безопасность эксплуатации оборудования.

Вследствие сказанного наблюдается рассогласованность и физическая раздробленность данных измерений. Качество измеренных данных таково, что в них присутствуют многочисленные пропуски. Негативную роль играет тот факт, что одновременно эксплуатируется измерительное оборудование и системы различных поколений, разных производителей и т.д.

В условиях несогласованности и труднодоступности данных технологии имитационного моделирования технологических процессов представляются наиболее подходящими на текущем этапе исследования объекта.

Таким образом, *имитационными моделями* мы можем считать любые модели, включая теоретические, которые невозможно исследовать аналитическими методами, требующими использования численных методов решения. Также к имитационным моделям отнесем модели, построенные на аналогиях, анализе сходных эффектов в объектах, имеющих различную физическую природу. В качестве примера можно привести динамическую модель процессов в нефтепроводе, предложенную в работе [197]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = L \frac{\partial Q}{\partial t} + RQ, \\ -\frac{\partial Q}{\partial x} = C \frac{\partial P}{\partial t}, \end{cases} \quad (6.1)$$

Модель имеет вид системы дифференциальных уравнений с частными производными, связывающими две основные величины, зависящие от координаты сечения x и времени t : давление $P(x,t)$ и расход $Q(x,t)$. Коэффициенты в уравнениях L , R и C – параметры единицы длины трубопровода, имеющие смысл индуктивности, сопротивления и емкости. Модель (6.1) составлена в терминах электродинамики. При этом подразумевается аналогия между течением жидкости по трубам и электрического тока в проводнике. Индуктивность отражает инерционность нефти в трубопроводе, сопротивление тождественно гидравлическому сопротивлению, емкость отражает способность трубопровода с нефтью вмещать дополнительное количество нефти под действием давления за счет упругости трубы и перекачиваемой нефти [197]. Параметры, входящие в уравнение (6.1), можно рассчитать как с использованием теоретических закономерностей, либо отыскать при помощи процедуры идентификации на основании данных измерений давления $P(x, t)$ и расхода $Q(x, t)$.

Традиционно для решения задачи построения моделей неустановившихся процессов в трубопроводе привлекаются *нестационарные модели гидродинамики*, включая описание процессов уравнениями в частных производных, таких как уравнения Навье-Стокса. Во многом, допущения и закономерности в построении этого вида уравнений имеет эвристическую природу. Более того, трудности с аналитическим решением таких уравнений преодолеваются их упрощением, а также применением численных методов их решения. Таким образом, здесь мы также сталкиваемся с применением элементы технологии *имитационного моделирования*.

В условиях недостатка априорных сведений об объекте и особенностей получения, обработки и хранения данных, поступающих с измерительных

устройств и в результате химических анализов, применение средств имитационного моделирования протекающих в трубопроводе процессов зачастую не имеет альтернативы.

Настоящая глава диссертации направлена на построение имитационных моделей гидродинамических процессов в магистральном нефтепроводе в ситуации недостатка и рассогласованности измерений технологических параметров. Она содержит описание подходов к численному решению уравнений Навье-Стокса, а также синтезу эвристической модели неустановившихся процессов в трубопроводе.

6.2 Уравнения гидродинамики для описания неустановившихся процессов в трубопроводе

Гидродинамика – наука, описывающая движение жидкости [48]. Гидродинамика имеет решающее значение для построения моделей течения жидкости в трубопроводе. Основные результаты гидродинамики базируются как на эмпирическом знании, так и на традиционном аппарате математической физики, включая дифференциальные уравнения в частных производных [109].

Уравнения гидродинамики основаны на трех основополагающих физических принципах:

- закон сохранения массы (условие неразрывности),
- уравнение изменения импульса (или уравнение движения),
- закон сохранения энергии.

Рассмотрим уравнения течения жидкости в трубопроводе для случая вязкой слабосжимаемой жидкости. Принимается случай так называемой *ньютоновской жидкости*, т.е. такой жидкости, вязкость которой не зависит от скорости её течения. Для случая описания движения жидкости в трубопроводе ограничимся уравнениями с единственной пространственной координатой.

Уравнение неразрывности обычно принимается в следующем виде [119]:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho v S}{\partial x} = 0, \quad (6.2)$$

где ρ - плотность жидкости; S – площадь сечения трубопровода; v – линейная продольная скорость течения жидкости.

После линеаризации в окрестности номинальных значений давления ρ_0 и площади сечения трубопровода S_0 , а также некоторых тождественных преобразований уравнение (6.2) принимает форму [119]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad (6.3)$$

где c – параметр, характеризующий скорость распространения волн в трубопроводе:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_0}{K} + \frac{\rho_0 d_0}{E \delta}}}. \quad (6.4)$$

Здесь приняты следующие обозначения: K – коэффициент сжимаемости жидкости ($K \approx 10^9 \text{ Па}$), d_0 – внутренний диаметр трубопровода, E – модуль Юнга материала трубы, δ - толщина стенки трубопровода.

Уравнение движения имеет следующий вид [119]:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{4}{d} \tau_w - \rho g \sin \alpha(x), \quad (6.5)$$

где $p = p(x, t)$ - давление жидкости в сечении с координатой x в момент времени t ; d – внутренний диаметр трубопровода; τ_w - касательное напряжение трения на стенках трубопровода; g – ускорение силы тяжести; $\alpha(x)$ - угол наклона касательной к продольной оси в сечении трубопровода с соответствующей координатой.

Касательное напряжение трения на стенках трубопровода определяется по формуле:

$$\tau_w = \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \rho v^2 / 8, \quad (6.6)$$

где $\lambda(\text{Re}, \varepsilon)$ - коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от относительной шероховатости ε внутренней поверхности трубы $\varepsilon = \Delta/d$ и числа Рейнольдса $\text{Re} = v^2 d/\nu$, где ν - кинематическая вязкость жидкости. Соотношение (6.6) получено для случая установившегося режима течения, однако, оно используется и в уравнениях для описания неустановившихся процессов. В случае неизменности вида зависимости касательного напряжения, процесс течения называют *квазистационарным*.

Гидравлическое сопротивление характеризует трение потока жидкости о внутренние стенки трубопровода. Этот эффект приводит к рассеянию энергии гидравлического потока, и, как следствие к изменению давления в зависимости от координаты сечения. Трение характеризуется величиной коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda(\text{Re}, \varepsilon)$. Величина гидравлического сопротивления для вязкой слабосжимаемой жидкости зависит от характера течения (ламинарный, турбулентный) и шероховатостью внутренних стенок.

Изучению характера зависимости $\lambda = \lambda(\text{Re}, \varepsilon)$ были посвящены многие классические работы в области гидродинамики, например [39], [218], [233] и др. Они были посвящены преимущественно нахождению эмпирических зависимостей $\lambda = \lambda(\text{Re}, \varepsilon)$ для различных условий течения жидкостей, конфигурации трубопроводов и т. д. В результате, в настоящее время принята система зависимостей, приведенная в таблице 6.1 [201], [23].

Таблица 6.1. Эмпирические зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от диапазона значений числа Рейнольдса

Режим течения жидкости	Формула расчета коэффициента гидравлического сопротивления при соответствующем режиме течения	Диапазон значений числа Рейнольдса при соответствующем режиме течения
1	2	3
Ламинарный	$\lambda = \frac{64}{Re}$,	$Re < 2320$,
Переходный турбулентный	$\lambda = \frac{64}{Re}(1 - \gamma) + \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}\gamma$,	$2320 \leq Re < 10000$,
Развитый турбулентный	$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}$,	$10000 < Re < \frac{27}{\varepsilon^{1.141}}$,
Зона смешанного трения	$\lambda = 0.11 \left(\varepsilon + \frac{64}{Re} \right)^{1/4}$,	$\frac{27}{\varepsilon^{1.141}} < Re < \frac{500}{\varepsilon}$,
Зона квадратичного Трения	$\lambda = 0.11 \varepsilon^{1/4}$	$Re > \frac{500}{\varepsilon}$.

В таблице 6.1 приняты следующие обозначения: $\gamma = 1 - e^{-0.002(Re-2320)}$ – коэффициент перемежаемости; Δ – абсолютная шероховатость; $\varepsilon = \Delta/D$ – относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода; D – внутренний диаметр трубопровода.

С учетом предположений о слабой сжимаемости жидкости, незначительности изменения внутреннего диаметра трубопровода, а также априорных знаний о невысоких скоростях течения жидкости по магистральному трубопроводу уравнение движения может быть записано в следующей форме:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda(Re, \varepsilon) \frac{1}{d_0} \frac{\rho_0 v |v|}{2} - \rho_0 g \sin \alpha(x). \quad (6.7)$$

Таким образом, система уравнений, описывающих течение слабосжимаемой вязкой жидкости в трубопроводе, имеет следующий вид [119]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda(\text{Re}, \varepsilon) \frac{1}{d_0} \frac{\rho_0 v |v|}{2} - \rho_0 g \sin \alpha(x). \end{cases} \quad (6.8)$$

Система уравнений (6.8) является одним из вариантов уравнений Навье–Стокса, ее относят к *гиперболическому типу* [45]. Для решения системы уравнений (6.8), то есть для нахождения искомых значений давления $p = p(x, t)$ и скорости $v = v(x, t)$ течения жидкости на участке трубопровода $0 < x < L$ в моменты времени $t > 0$, систему уравнений необходимо дополнить краевыми (граничными) и начальными условиями.

Начальные условия определяют распределения давлений и скоростей течения жидкости в зависимости от координаты сечения трубопровода в начальный момент времени $t = 0$: $p = p(x, 0)$ и $v = v(x, 0)$. Начальные условия описывают некоторый установившийся режим перекачки перед началом переходного процесса.

Краевые (или граничные) условия задают зависимости переменных, входящих в уравнения гидродинамики, в начальном и конечном сечениях участка трубопровода с координатами $x = 0$ и $x = L$ при $t > 0$. Краевые условия отражают взаимодействие рассматриваемого участка трубопровода с устройствами, расположенными на его краях [119].

6.3 Способы решения уравнений гидродинамики. Метод характеристик

Допущения, положенные в основу вывода уравнений Навье–Стокса (6.8) (слабая сжимаемость, постоянная вязкость и др.), являются, в общем случае, интуитивными, т. е. в некоторой степени произвольными. И поэтому заранее нельзя быть уверенным, что эти уравнения правильно отражают закономерности движения вязкой жидкости. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными затрудняется тем, что получение общего решения в полном виде невозможно [217].

Таким образом, можно утверждать, что уравнения гидродинамики, в частности уравнения Навье-Стокса вида (6.8), не имеют точного аналитического решения, либо могут быть решены лишь приближенно. Этот факт обусловлен нелинейным характером уравнений, существенным влиянием решения от характера начальных и граничных условий, а также значительной чувствительностью решения к изменению коэффициентов уравнения при турбулентном режиме. В связи с этим, на практике для гидродинамических расчетов применяют численные методы уравнений Навье-Стокса, которые вырабатываются в рамках вычислительной гидродинамики.

Вычислительная гидродинамика [174], [232] находится на стыке классической гидродинамики, теории численных методов и компьютерной графики. Методы вычислительной гидродинамики активно используются для описания процессов течения нефти в трубопроводе. В частности, в [269] рассматривается влияние параметров нефти на процесс ее движения и образования парафиновых отложений, в [270] предлагается синтез методов вычислительной гидродинамики и статистических методов построения моделей тепловых процессов с учетом влияния параметров нефти и материала трубопровода. В настоящей работе рассматривается укрупненная модель участка нефтепровода, основанная на методах вычислительной гидродинамики.

Выделяют два численных метода решения уравнений гидродинамики:

- метод конечных разностей,
- метод конечных элементов.

Метод конечных разностей основан на замене производных в уравнениях разностными схемами (аппроксимация производных отношениями конечных разностей) [182]. В пространстве независимых переменных, входящих в уравнения, вводится сетка, и решение отыскивается не в виде непрерывной функции, а в виде дискретного, конечного множества чисел, представляющих (заменяющих) искомую функцию на дискретном, конечном множестве значений независимых переменных, т.е. в узлах наложенной сетки. Численное интегрирование уравнения, как правило, сводится к решению системы

алгебраических уравнений. Способы формирования сетки, разновидности используемых разностных схем, условия сходимости решения, способы решения результирующей системы алгебраических уравнений составляют предмет изучения *теории разностных схем* [183], на практике же определяют множество методов указанного семейства.

Метод конечных элементов [60] заключается в разбиении пространства независимых переменных на подобласти с последующим выбором аппроксимирующей функции для каждой области. Коэффициенты аппроксимирующих функций отыскивают из условия равенства значения соседних функций на границах между областями. Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Для отыскания коэффициентов составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений будет равно количеству неизвестных значений коэффициентов и прямо пропорционально количеству элементов. Метод конечных элементов позволяет получать непрерывные решения уравнений, что удобно в некоторых областях их применения. Метод появился несколько позже, чем метод конечных элементов, в эпоху интенсивного развития средств вычислительной техники, так как он требует для своей реализации, по сравнению с предшественником, значительно больших вычислительных ресурсов.

Для решения системы уравнений вида (6.8) может быть использован *метод характеристик* [45], [119], который заключается в приведении уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Метод характеристик был предложен Даламбером для анализа процессов колебания струн [194], также он удобен для решения гиперболических уравнений, в том числе возникающих в задачах гидродинамики.

Характеристиками называют прямые линии на плоскости переменных (x, t) , которые определяются одним из представленных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = c, \quad \frac{dx}{dt} = -c, \quad (6.9)$$

или эквивалентными им зависимостями:

$$x - ct = \xi = const, \quad x + ct = \eta = const. \quad (6.10)$$

Производными от функции $A = A(x, t)$ по направлениям характеристик называются следующие функции [119]:

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_{\xi=const} = \frac{\partial A}{\partial t} + c \frac{\partial A}{\partial x}, \quad \left(\frac{dA}{dt}\right)_{\eta=const} = \frac{\partial A}{\partial t} - c \frac{\partial A}{\partial x}. \quad (6.11)$$

Используя понятие производной по направлению, систему уравнений (6.8) можно переписать в виде [119]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(p + \rho_0 cv)_{\xi=const} = -\lambda \frac{\rho_0 cv |v|}{2d} - \rho_0 cg \sin \alpha, \\ \frac{d}{dt}(p - \rho_0 cv)_{\eta=const} = \lambda \frac{\rho_0 cv |v|}{2d} + \rho_0 cg \sin \alpha. \end{cases} \quad (6.12)$$

Численное решение системы (6.8) методом характеристик предполагает переход от производных по направлениям характеристик к конечным разностям вдоль характеристик:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta A}{\Delta t}\right)_{\xi=const} &= \frac{[A(x, t) - A(x, t - \Delta t)]}{\Delta t} + c \frac{[A(x, t) - A(x - \Delta x, t)]}{\Delta x}, \\ \left(\frac{\Delta A}{\Delta t}\right)_{\eta=const} &= \frac{[A(x, t) - A(x, t - \Delta t)]}{\Delta t} - c \frac{[A(x + \Delta x, t) - A(x, t)]}{\Delta x}. \end{aligned} \quad (6.13)$$

Принимая во внимание тождество $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, получаем:

$$\begin{aligned} \Delta(A)_{\xi=const} &= [A(x, t) - A(x, t - \Delta t)] + [A(x, t) - A(x - \Delta x, t)], \\ \Delta(A)_{\eta=const} &= [A(x, t) - A(x, t - \Delta t)] - [A(x + \Delta x, t) - A(x, t)]. \end{aligned} \quad (6.14)$$

Эти соотношения можно переписать в более простой форме:

$$\begin{aligned} \Delta(A)_{\xi=const} &= A(x, t) - A(x - \Delta x, t - \Delta t), \\ \Delta(A)_{\eta=const} &= A(x, t) - A(x + \Delta x, t - \Delta t). \end{aligned} \quad (6.15)$$

С учетом (6.15) получим систему разностных уравнений для определения давления и скорости жидкости в трубопроводе [119]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p(x,t) + \rho_0 cv(x,t) = p(x - \Delta x, t - \Delta t) + \rho_0 cv(x - \Delta x, t - \Delta t) - \\ - \Delta t \left[\lambda \frac{\rho_0 cv(x - \Delta x, t - \Delta t) |v(x - \Delta x, t - \Delta t)|}{2d} + \rho_0 cg \sin \alpha(x - \Delta x) \right], \\ p(x,t) - \rho_0 cv(x,t) = p(x + \Delta x, t - \Delta t) - \rho_0 cv(x + \Delta x, t - \Delta t) + \\ + \Delta t \left[\lambda \frac{\rho_0 cv(x + \Delta x, t - \Delta t) |v(x + \Delta x, t - \Delta t)|}{2d} + \rho_0 cg \sin \alpha(x + \Delta x) \right]. \end{array} \right. \quad (6.16)$$

Для нахождения давления и скорости течения жидкости в начальном и конечном сечениях, необходимо использовать граничные условия. Пусть для левого сечения с координатой $x = 0$ граничное условие имеет вид:

$$F(p(0,t), v(0,t)) = 0, \quad (6.17)$$

а для правого при $x = L$:

$$G(p(L,t), v(L,t)) = 0. \quad (6.18)$$

Тогда процессы в левом сечении участка трубопровода будут определяться в результате решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} p(0,t) - \rho_0 cv(0,t) = p(\Delta x, t - \Delta t) - \rho_0 cv(\Delta x, t - \Delta t) + \\ + \Delta t \left[\lambda \frac{\rho_0 cv(\Delta x, t - \Delta t) |v(\Delta x, t - \Delta t)|}{2d} + \rho_0 cg \sin \alpha(\Delta x) \right], \\ F(p(0,t), v(0,t)) = 0, \end{array} \right. \quad (6.19)$$

а в правом, соответственно, из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} p(L,t) + \rho_0 cv(L,t) = p(L - \Delta x, t - \Delta t) + \rho_0 cv(L - \Delta x, t - \Delta t) - \\ - \Delta t \left[\lambda \frac{\rho_0 cv(L - \Delta x, t - \Delta t) |v(L - \Delta x, t - \Delta t)|}{2d} + \rho_0 cg \sin \alpha(L - \Delta x) \right], \\ G(p(L,t), v(L,t)) = 0. \end{array} \right. \quad (6.20)$$

Таким образом, используя уравнения (6.16), (6.19) и (6.20), можно составить расчетную схему и соответствующей ей алгоритм расчета давления и скорости течения жидкости для узлов сетки в пространстве времени и координаты сечения для участка трубопровода.

6.4 Метод расчета параметров участка трубопровода с использованием метода характеристик и его алгоритмическая реализация

Дадим словесное описание алгоритма расчета гидравлических параметров участка трубопровода с использованием разностных уравнений, построенных в соответствии с методом характеристик.

Шаг 1. Задать значение $\Delta x = L/N$, где N – целое число, $N \geq 2$.

Шаг 2. Определить Δt , используя следующее соотношение: $\Delta t = \Delta x/c$, где c – продольная скорость распространения волн давления в трубопроводе.

Шаг 3. Задать начальные значения в узлах сетки по давлению: $p(0,0)$, $p(\Delta x,0)$, $p(2\Delta x,0), \dots, p(L,0)$,

и по скорости течения: $v(0,0)$, $v(\Delta x,0)$, $v(2\Delta x,0), \dots, v(L,0)$.

Шаг 4. Перебрать $N+1$ узлов сетки поочередно, вычисляя значения $p(0,\Delta t), \dots, p(L,\Delta t)$ и $v(0,\Delta t), \dots, v(L,\Delta t)$, используя системы уравнений (6.16) для внутренних узлов, (6.19), (6.20) для узлов, соответствующих крайним левому и правому сечениям участка трубопровода соответственно.

Шаг 5. Повторять шаг 4 настоящего алгоритма для дискретных значений времени $2\Delta t$, $3\Delta t$ и так далее.

Для учета граничных (краевых) условий в алгоритме применяются:

- источник давления;
- источник потока;
- модель насоса (с расходно-напорной характеристикой, характеристикой КПД и т.д.).

Примеры расходно-напорных характеристик для центробежных насосов НМ3500-230 и НМ2500-230 изображены на рисунке 6.1.

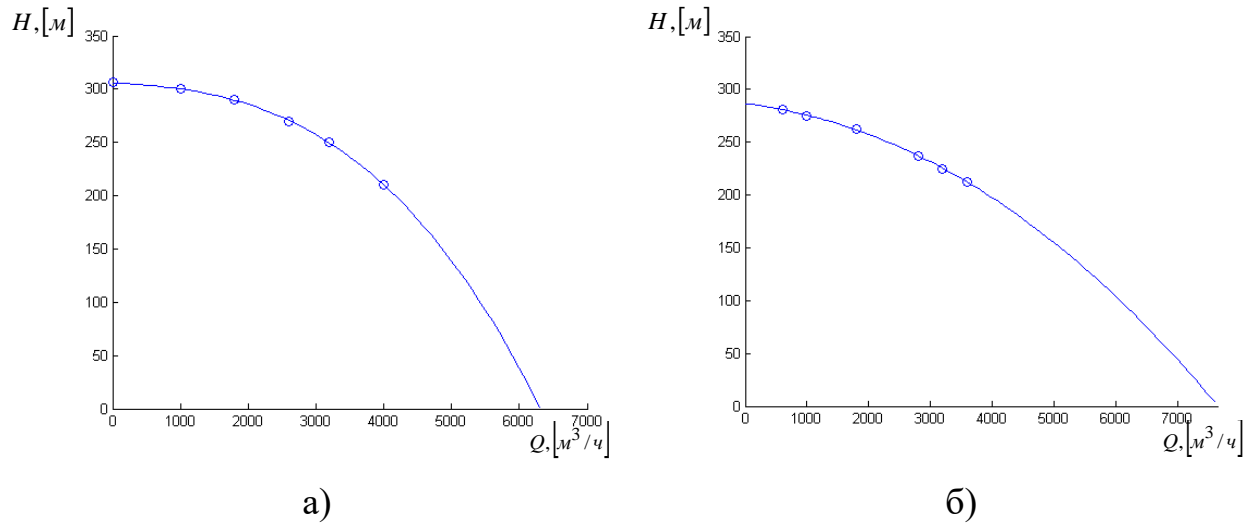


Рисунок 6.1. Расходно-напорные характеристики для насосов:

а) NM3500-230, б) NM2500-230

Изображенные характеристики могут использоваться для аппроксимации граничных условий вида (6.17) и (6.18). Традиционно используются квадратические или кубические аппроксимации [201]. Коэффициенты в аппроксимационных зависимостях определяются из таблиц с данными о магистральных насосах [201]. Значения гидравлического напора H , создаваемого насосом, связано с давлением p следующим соотношением:

$$H = \frac{p}{\rho g}, \quad (6.21)$$

Объемный расход Q связан со скоростью потока:

$$Q = 3600 \cdot v \cdot \frac{\pi d^2}{4}. \quad (6.22)$$

В процессе работы в результате старения оборудования, а также после проведенных ремонтов, характеристики насосов существенно отклоняются от тех, которые заявлены заводом-изготовителем в сопровождающей документации или представлены в соответствующих справочных таблицах. В этом случае необходимо проводить испытания насосных агрегатов с уточнением их характеристик, либо применять адаптивные методы с пассивным накоплением данных в режиме нормальной эксплуатации насосов.

При построении моделей насосов нередко предлагается учитывать их динамические (разгонные) характеристики [119], [197], учитывая в модели насоса *уравнения выбега*. Однако на практике в процессе запуска и остановки насосов их динамический характер практически не проявляется. Это обусловлено принятыми в нефтетранспортных компаниях процедурами запуска насосных агрегатов. Пуск центробежного насоса, как правило, производится при закрытой задвижке на напорном трубопроводе (примыкающий к выпускному патрубку насоса). После достижения насосом полного числа оборотов задвижку медленно открывают. Это соответствует движению рабочей точки на расходно-напорной характеристике из точки $Q = 0$ в сторону увеличения значения Q .

Программная реализация алгоритма метода характеристик с учетом граничных условий производилась в пакете математических вычислений MATLAB 2012. Исходные данные для некоторых экспериментов с алгоритмом построения модели собраны в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 - Принятые значения параметров модели

Наименование параметра модели	Обозначение и размерность	Порядковый номер эксперимента	
		I	II
1	2	3	4
Плотность жидкости	$\rho_0, [кг/м^3]$	850	850
Длина участка трубопровода	$L, [м]$	2000	2000
Шаг сетки разностной схемы	$\Delta x, [м]$	125	4
Внутренний диаметр трубопровода	$d, [м]$	0,72	0,72
Относительная шероховатость внутренних стенок трубопровода	$\varepsilon, \text{ безразмерная величина}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$
Скорость распространения волн давления	$c, [м/с]$	1000	1000

Окончание таблицы 6.2

1	2	3	4
Ускорение силы Тяжести	$g, [м/с^2]$	9,81	9,81
Базовое давление в трубопроводе	$p_0, [Па]$	101325	202650
Характеристика профиля трубопровода	-	Горизонтальный	
Начальные условия	-	$v(x,0)=0,$ $p(x,0)=p_0$	$v(x,0)=0,$ $p(x,0)=p_0$
Граничные условия	-	$p(0,t)=2p_0,$ $v(L,t)=0$	$p(0,t)=\begin{cases} \frac{3}{2}p_0, 10 < t < 40 \\ p_0, t \leq 10, t \geq 40 \end{cases}$ $v(L,t)=0$
Описание численного эксперимента	-	Реакция системы на ступенчатое воздействие по давлению в левом граничном сечении. Заглушка в правом граничном сечении	Реакция системы на прямоугольный импульс по давлению в левом граничном сечении. Заглушка в правом граничном сечении
Рисунок, иллюстрирующий поведение модели	-	Рис. 6.2	Рис. 6.3

Приведем иллюстрации работы программы, осуществляющей расчеты гидравлических параметров для приведенных в таблице 6.2 исходных данных.

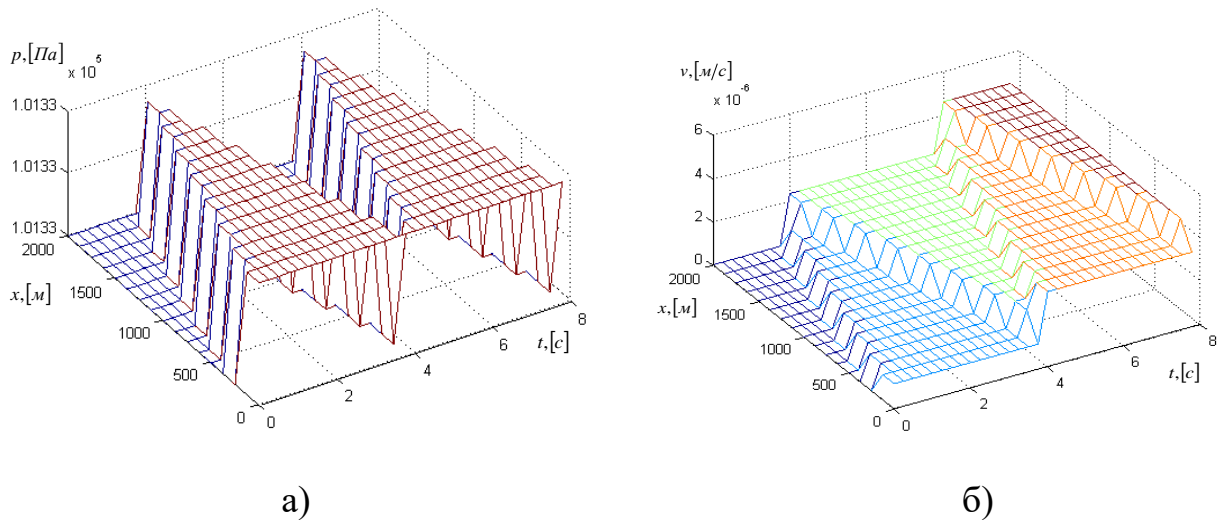


Рисунок 6.2. Расчетные значения давления а) и скорости потока, б) в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента I

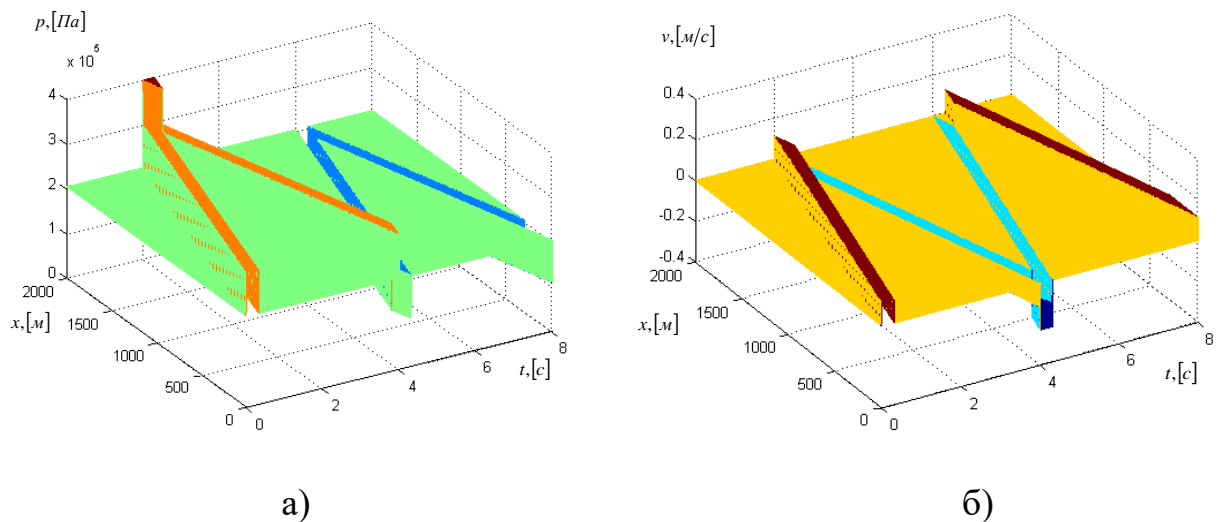


Рисунок 6.3. Расчетные значения давления а) и скорости потока, б) в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента II

Настройка модели и реализующего ее вычислительного алгоритма осуществляется экспертом (инженером-технологом). В самом начале необходимо выбрать сетку в пространстве переменных, входящих в модель. Шаги сетки по времени и координате должны быть связаны соотношением

$c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. При этом величины Δx и Δt должны обеспечивать точность и устойчивость процесса решения, с одной стороны, а также необходимую скорость работы программной реализации алгоритма. Особое внимание в настройке необходимо уделить скорости затухания волн, которая определяется коэффициентом гидравлического сопротивления. При необходимости требуется произвести коррекцию значений λ .

Среди особенностей рассматриваемой гидродинамической модели следует выделить следующие:

- модель не учитывает термогидравлические процессы;
- модель описывает процессы в ньютоновской жидкости, вязкость которой неизменна (в реальности вязкость меняется от характера течения, а также является функцией температуры нефти);
- фронт волны давления не изменяется (в реальных процессах в трубопроводе наблюдается его постепенное сглаживание);
- скорость перемещения волн берется равной константе, что изначально закладывается в принцип построения модели (6.8).
- вид системы уравнений не позволяет учитывать характерные волновые явления, такие как разрежение, следующее после волны давления и т.д.
- в модели не учитывается нестационарность (изменение ее параметров с течением времени).

Модель (6.8) может быть усовершенствована. Например, можно предложить ее модификации, учитывающие *эффект присоединенной массы* [119] и некоторые другие эффекты.

Другой способ устранения недостатков заключается в построении эвристических моделей неустановившихся нестационарных процессов в трубопроводе.

6.5 Эвристическая модель неустановившихся процессов в нефтепроводе

Предложим эвристический подход к построению гидродинамических моделей для описания неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе [7].

За основу примем следующее предположение. Пусть участок трубопровода разделен на конечное количество равных сегментов (рисунок 6.4).

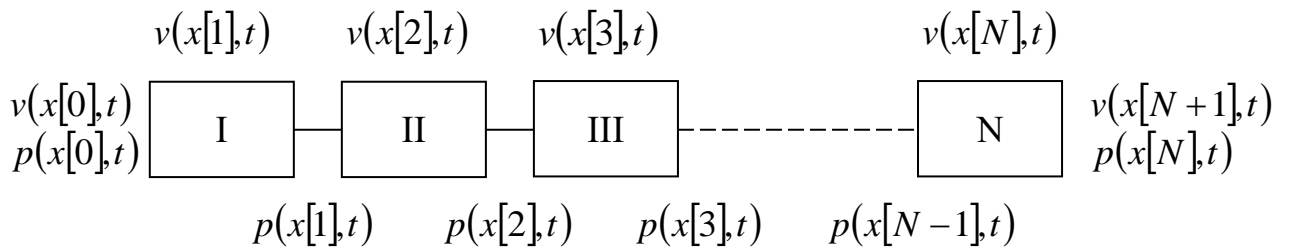


Рисунок 6.4. Схема разбиения участка трубопровода на сегменты

Каждый из участков характеризуется определенным набором свойств протекающей по нему нефти, включая физические ее параметры: плотность ρ , вязкость ν , температуру T , скорость потока v , внутренний диаметр трубопровода d и т.д. На левой и правой границах каждого сегмента заданы определенные значения давления p .

Определяем временную сетку с шагом Δt , связанным со значением длины сегментов трубопровода Δx через скорость распространения волн давления. В качестве модели течения жидкости в сегменте трубопровода на протяжении временного шага Δt принимаем модель установившегося течения в виде уравнения Бернулли [119]:

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{\rho g} + (z_{вх} - z_{вых}) = \frac{\lambda(\text{Re}, \varepsilon) \cdot \Delta x \cdot v^2}{2dg}, \quad (6.23)$$

где $P_{вх}$, $P_{вых}$ - давления во входном и выходном сечениях сегмента трубопровода; $z_{вх}$, $z_{вых}$ - геометрические высоты указанных сечений. Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda(\text{Re}, \varepsilon)$ может быть рассчитан в

соответствии с ранее описанной методикой. Левая часть уравнения представляет собой суммарную разницу напоров на концах сегмента трубопровода, в правой части потеря напора за счет действия сил трения жидкости о стенки трубопровода.

Из уравнения Бернулли выражаем силу трения, действующую на поток жидкости в трубопроводе для дискретного значения времени $[t]$:

$$F_{mp}[t] = \frac{\lambda(\text{Re}, \varepsilon) \cdot \Delta x \cdot S \cdot v[t] \cdot |v[t]| \cdot \rho[t]}{2d}, \quad (6.24)$$

где плотность жидкости находится, например, из соотношения

$$\rho[t] = \rho_0 + \beta \cdot \rho_0 \cdot (p_{ex}[t]/2 + p_{ввх}[t]/2 - p_0), \quad (6.25)$$

где β - коэффициент сжимаемости жидкости $[1/\text{Па}]$, ρ_0 - плотность жидкости при нормальных условиях. Таким образом, принимается линейный закон изменения плотности в зависимости от среднего давления жидкости в сегменте модели.

Жидкость в рассматриваемом сегменте, в свою очередь, приводится в движение силой напора, вызванной разницей давлений на краях сегмента:

$$F_{nan}[t] = (p_{ex}[t] - p_{ввх}[t]) \cdot S + (z_{ex} - z_{ввх}) \cdot g \cdot \rho[t] \cdot S. \quad (6.26)$$

Жидкость в момент времени $[t]$ подвергается действию суммарной силы $F_{nan}[t] - F_{mp}[t]$. Это приводит к движению жидкости с ускорением:

$$a[t+1] = (F_{nan}[t] - F_{mp}[t]) / \rho[t] \cdot \Delta x \cdot S. \quad (6.27)$$

С учетом (6.27) можно пересчитать скорость потока для следующего момента времени $[t+1]$:

$$v[t+1] = v[t] + \Delta t \cdot (F_{nan} - F_{mp}) / \rho[t] \cdot \Delta x \cdot S. \quad (6.28)$$

Скоростной напор жидкости приводит к изменению давлений в границах между соседними сегментами:

$$p[t+1] = p[t] + \rho_{ex}[t] v_{ex}[t+1] \cdot |v_{ex}[t+1]| - \rho_{ввх}[t] v_{ввх}[t+1] \cdot |v_{ввх}[t+1]| \quad (6.29)$$

Давления (6.29) пересчитываются для всех граничных точек и служат исходными данными для дальнейшего расчета в соответствии с формулой (6.24) и далее.

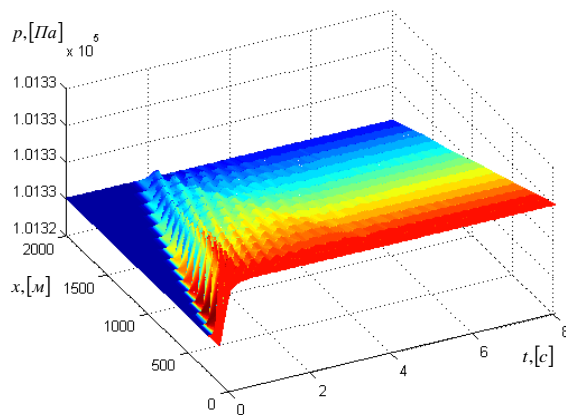
Таким образом, получаем циклический алгоритм, позволяющий прогнозировать развитие процессов в участке трубопровода с течением времени. Описанный алгоритм был реализован в виде программы в системе MATLAB 2012 [7]. Как было сделано ранее для модели Навье-Стокса (6.8), исходные данные при построении моделей собраны в таблицу (см. таблицу 6.3).

Таблица 6.3 - Принятые значения параметров модели

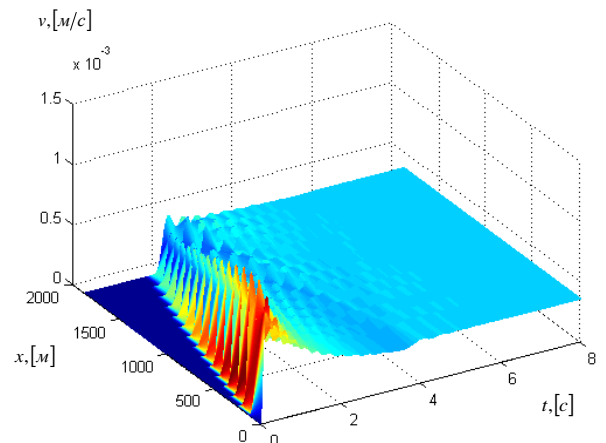
Наименование параметра модели	Обозначение и размерность	Порядковый номер эксперимента		
		III	IV	V
1	2	3	4	5
Плотность жидкости	$\rho_0, [\text{кг}/\text{м}^3]$	850	850	850
Длина участка Трубопровода	$L, [\text{м}]$	2000	2000	2000
Длина расчетного Сегмента	$\Delta x, [\text{м}]$	125	125	125
Внутренний диаметр трубопровода	$d, [\text{м}]$	0,72	0,72	0,72
Относительная шероховатость внутренних стенок трубопровода	ε , безразмерная величина	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$
Скорость распространения волн давления	$c, [\text{м}/\text{с}]$	1000	1000	1000
Ускорение силы Тяжести	$g, [\text{м}/\text{с}^2]$	9,81	9,81	9,81
Базовое давление в трубопроводе	$p_0, [\text{Па}]$	101325	101325	506625
Характеристика профиля трубопровода	-	Горизонтальный		
Начальные условия	-	$v(x,0)=0,$ $p(x,0)=p_0$	$v(x,0)=0,$ $p(x,0)=p_0$	$v(x,0)=0,$ $p(x,0)=p_0$

Окончание таблицы 6.3

1	2	3	4	5
Граничные условия	-	$p(0,t) = 2p_0,$ $v(L,t) = 0$	$p(0,t) = \begin{cases} 5p_0, 10 < t < 40 \\ p_0, t \leq 10, t \geq 40 \end{cases}$ $v(L,t) = 0$	$p(0,t) = p_0,$ $p(L,t) = p_0$
Описание численного эксперимента	-	Реакция системы на ступенчатое воздействие по давлению в левом граничном сечении. Заглушка в правом граничном сечении	Реакция системы на прямоугольный импульс по давлению в левом граничном сечении. Заглушка в правом граничном сечении	В сечении трубопровода с координатой $x = 1250$ происходит включение насоса НМ3500-230
Рисунок, иллюстрирующий поведение модели	-	Рис. 6.5	Рис. 6.6	Рис. 6.7



а)



б)

Рисунок 6.5. Расчетные значения давления а) и скорости потока б) в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента III

Условия эксперимента III полностью повторяют условия, принятые в эксперименте I. Разница в результатах моделирования проявляется в следующем:

- степень затухания;
- осциллирующий характер модели,
- скорость распространения волн.

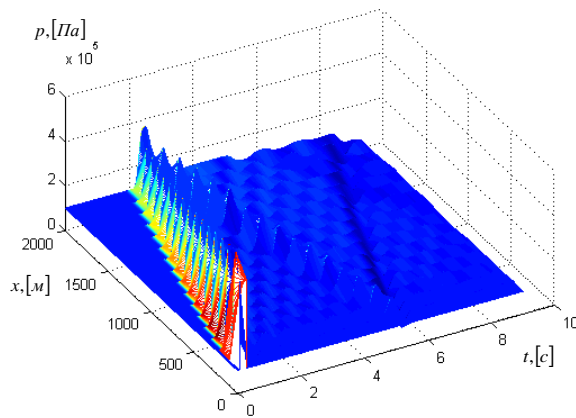
Кратко обсудим каждый из перечисленных пунктов.

Несмотря на схожий подход к учету сил сопротивления, оказываемого стенками трубопровода на поток жидкости, степени затухания двух моделей значительно отличаются. Следовательно, для решения практических задач требуется настройка коэффициентов гидравлического сопротивления. Скорость затухания должна настраиваться по данным измерений линейных датчиков давления магистрального нефтепровода.

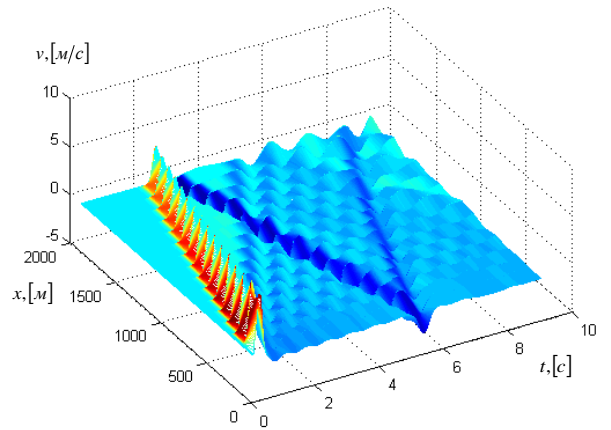
Осцилляции в эвристической модели обусловлены способом ее формирования из моделей конечных сегментов, в которых кинетическая энергия движущейся жидкости переходит в потенциальную энергию разности давлений и наоборот. В данном случае, осциллирующий характер согласуется с данными наблюдений процессов в трубопроводе. Период осцилляций связан с шагом разбиения участка трубопровода на сегменты, следовательно, выбор величин Δx и Δt будет основан на параметрах волновых характеристик распространения возмущений в трубопроводе [7].

Скорость распространения волн давления в представленной эвристической модели не является постоянной. В этом смысле, можно предполагать, что модель учитывает *эффект присоединенных масс*, что требует более тщательного анализа.

Следующий рисунок (рисунок 6.6) [7] иллюстрирует процессы, происходящие в результате подачи кратковременного прямоугольного импульса по давлению в крайнем левом сечении трубопровода. Волна давления отражается от заглушки, расположенной в крайнем правом сечении участка трубопровода.



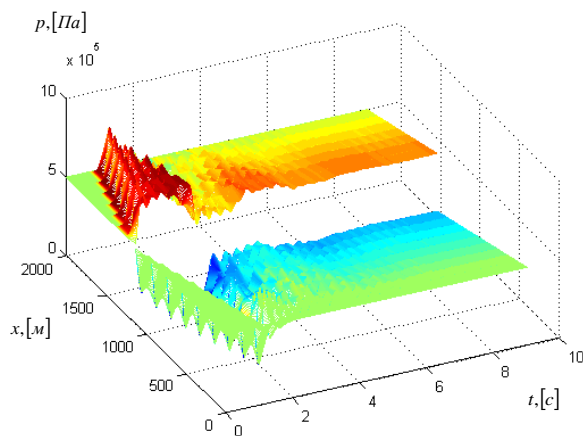
а)



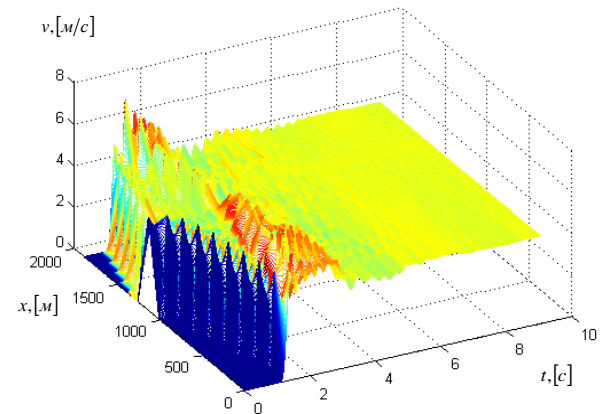
б)

Рисунок 6.6. Расчетные значения давления а) и скорости потока б) в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента IV

На рисунке 6.7 [7] изображен результат модельного эксперимента по включению насоса НМ3500-230. Для описания насоса использовали кубическую аппроксимацию его расходно-напорной характеристики (см. рисунок 6.1).



а)



б)

Рисунок 6.7. Расчетные значения давления а) и скорости потока б) в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента V

В результате получены зависимости давления и скорости потока жидкости от координаты и времени, которые качественно соответствуют процессам, протекающим в магистральном нефтепроводе. Количественный анализ предложенного алгоритма будет возможен в процессе настройки моделей по данным измерений технологических параметров магистрального нефтепровода.

Выводы по главе 6

В настоящем разделе диссертации приведено описание двух алгоритмов к построению имитационных моделей неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе: алгоритм численного решения уравнений Навье-Стокса методом характеристик, и алгоритм, реализующий эмпирический подход к построению моделей на основе физического описания конечного множества выделенных в трубопроводе сегментов. Обсуждены вопросы учета начальных и граничных условий в моделях, проанализированы их достоинства и недостатки, приведены иллюстрации работы программной реализации представленных алгоритмов.

Описанные в главе подходы к построению имитационных моделей участка магистрального нефтепровода позволяют проанализировать происходящие гидродинамические процессы с качественной стороны. Количественный анализ возможен в случае реализации шагов по совершенствованию измерительной аппаратуры, современных средств сбора и хранения данных измерений технологических параметров.

Глава 7. Использование пакета Matlab/SimHydraulics для построения модели неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе

7.1. Характеристики программных продуктов, применяемых в процессе построения гидродинамических моделей магистрального нефтепровода

Крупные компании нефтегазового сектора в настоящее время применяют различные инструменты для моделирования гидродинамических процессов в магистральных трубопроводах. Наиболее распространены следующие продукты:

- Comsol Multiphysics / Модуль Pipe Flow (COMSOL Inc.),
- FlowVision (Инжиниринговая компания ТЕСИС),
- FlowMaster V7 (Компания «Axis Engineering»),
- Гидросистема (ООО «НТП Трубопровод»),
- Cassandra (ООО «Энергоавтоматика»),
- Matlab / SimHydraulics (The MathWorks, Inc.).

Приведем краткую характеристику перечисленных продуктов.

Comsol Pipe Flow [141] – модуль, входящий в пакет программ Comsol Multiphysics, используется для моделирования потоков жидкости, теплопередачи, переноса массы, гидравлических переходных процессов, а также акустических явлений в системах труб и каналов. Моделирование потока в трубах обеспечивает получение скорости, давления, концентрации материалов, а также распределения температуры в трубах и каналах, с возможностью моделирования распространения акустических волн и гидравлического удара.

Модуль *Pipe Flow* осуществляет моделирование потоков несжимаемой жидкости в трубах и каналах достаточной длины, чтобы поток считался полностью развитым. В нем используются краевые элементы и одна тангенциальная компонента средней скорости, направленная вдоль краев с тем,

чтобы не строить двумерную или трехмерную сетку в поперечном сечении трубы. Это значит, что моделируемые переменные усредняются в поперечном сечении трубы и что они изменяются только вдоль длины трубы. Встроенные выражения для расчета коэффициентов трения Дарси охватывают все режимы течения, включая ламинарное и турбулентное течение, для ньютоновских и неньютоновских жидкостей при различной форме поперечного сечения или геометрии для широкого диапазона относительных значений шероховатости поверхности. Эти параметры могут изменяться в зависимости от положения в сети или их можно непосредственно связать с моделируемыми переменными.

Модуль *Pipe Flow* позволяет также учитывать влияние изгибов, сужений, расширений, Т-образных соединений и вентиляей, которое рассчитывается на основании обширной библиотеки стандартных отраслевых коэффициентов потерь, возможен также учет насосов в качестве устройств, которые вызывают течение.

Модуль *Pipe Flow* подходит для моделирования сетей труб и каналов любых видов, где возможно течение, перенос масс, теплопередача и распространение акустических волн. В их число входят системы трубопроводов на предприятиях химической и обрабатывающей промышленности, электростанциях, нефтеперерабатывающих заводах, нефтепроводы и водопроводы, системы вентиляции, системы охлаждения двигателей и турбин.

Интерфейсы для физики модуля *Pipe Flow* описывают сохранение момента, энергии и массы в жидкостях в системе труб или каналов. Эти системы легко связываются с другими системами, которые нельзя описать с помощью методов аппроксимации, включенных в модуль *Pipe Flow*, и которым требуется полное двумерное и трехмерное описание физических процессов в системе. Модуль *Pipe Flow* позволяет преобразовать данные для краев в данные для поверхностей и объемов, а также осуществлять обратное преобразование. Это означает, что поток и теплопередачу в сети труб можно связать с аналогичными процессами, происходящими, например, в полностью заполненном сеткой трехмерном сосуде, и решать их одновременно. Кроме

того, как и для всех основанных на физических процессах продуктов COMSOL, возможно такое связывание различных физических формул, которое позволяет легко находить решения для таких характеристик, как тепловое напряжение, например, тепловые напряжения в блоке цилиндров с каналами системы охлаждения.

В модуле *Pipe Flow* имеются специализированные интерфейсы для моделирования процессов теплопередачи и переноса массы, а также химических реакций. Трубопроводная сеть может быть встроена, например, в трехмерную сплошную область. В случае теплопередачи этот модуль рассчитывает баланс энергии в системе труб, включая вклад от взаимодействия в трехмерной области, который выражается в виде источников или стоков в уравнениях для трубы. Это производится автоматически в фоновом режиме путем активации взаимодействия с двумерным или трехмерным представлением сплошного материала в графическом пользовательском интерфейсе, где также можно выбрать одну из имеющихся корреляций для принудительной и естественной конвекции при нахождении в окружающей среде, материалов труб, а также толщин стенок труб, включенных в модуль *Pipe Flow*. Интерфейсы, созданные на основе переноса материалов, позволяют решать задачи баланса масс в системе труб, а при условии связи с описанием течений в трубах учитывают также диффузию, конвекцию, дисперсию и химические реакции.

Программный комплекс *FlowVision* [243] - комплексное многоцелевое решение для моделирования трехмерных течений жидкости и газа, созданный командой разработчиков компании ТЕСИС в тесном сотрудничестве с научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями в России и за рубежом.

FlowVision основан на численном решении трехмерных стационарных и нестационарных уравнений динамики жидкости и газа, которые включают в себя законы сохранения массы, импульса (уравнения Навье-Стокса), уравнения состояния. Для расчета сложных движений жидкости и газа, сопровождаемых

дополнительными физическими явлениями, такими, как, турбулентность, горение, контактные границы раздела, пористость среды, теплоперенос и так далее, в математическую модель включаются дополнительные уравнения, описывающие эти явления.

FlowVision использует конечно-объемный подход для аппроксимации уравнений математической модели. Уравнения Навье-Стокса решаются методом расщепления по физическим процессам (проекционный метод MAC).

FlowVision основан на следующих технологиях вычислительной гидродинамики и компьютерной графики:

- прямоугольная расчетная сетка с локальным измельчением расчетных ячеек;
- аппроксимация криволинейных границ расчетной области методом подсеточного разрешения геометрии;
- импорт геометрии из систем САПР и конечно-элементных систем через поверхностную сетку;
- ядро программы написано на языке C++;
- имеет клиент-серверную архитектуру;
- пользовательский интерфейс - для операционных систем MS Windows и Linux;
- система анализа результатов расчетов использует высококачественную графику на основе OpenGL;

FlowVision построен на базе единой интегрированной среды, в которой препроцессор, решатель и постпроцессор объединены и работают одновременно.

В функциональное назначение Препроцессора входит импорт геометрии расчетной области из систем геометрического моделирования, задание модели среды, расстановка начальных и граничных условий, генерация или импорт расчетной сетки и задание критериев сходимости.

После этого управление передается Решателю, который начинает процесс счета. При достижении требуемого значения критерия сходимости процесс счета может быть остановлен.

Результаты расчета непосредственно во время счета доступны для постпроцессора, в котором производится обработка данных - визуализация результатов и сохранение их во внешние форматы данных.

Такое построение позволяет проводить моделирование и, одновременно, визуализируя значение любой газодинамической переменной, анализировать результаты расчета, менять граничные условия и параметры математической модели.

Архитектура программного комплекса *FlowVision* является модульной, что позволяет легко добавлять новые функциональные возможности и вносить улучшения.

Пакет *FlowMaster V7 General Systems* [242] предназначен для моделирования тепловых и гидравлических систем, который используется многими компаниями в различных отраслях промышленности, в том числе в судостроении, в нефтегазовой промышленности, в электроэнергетике, в водоснабжении. *V7 General Systems* построен на платформе *FlowMaster V7 Platform*. *V7 General Systems* позволяет моделировать, оптимизировать, производить валидацию и искать неисправности в термогидравлических системах. Благодаря широкому спектру возможностей решателя и поставляемым совместно с модулем пакетом технических данных возможно проектирование концептуальных моделей уже в самом начале процесса разработки конечного продукта.

FlowMaster V7 General Systems позволяет быстро проектировать модели системы посредством использования встроенных компонентов и современного интуитивно понятного графического интерфейса. Единая база данных позволяет осуществлять сотрудничество множества инженеров в ходе работы над проектом. Открытый программный интерфейс приложения делает

возможной интеграцию *FlowMaster V7 General Systems* с программными продуктами других производителей.

Ключевые особенности *FlowMaster V7 General Systems*:

- обширная библиотека стандартных компонентов, основанная на эмпирических и расчетных данных;

- инструменты интеллектуального моделирования, помогающие избежать соединения несовместимых компонентов и использующие цветовую идентификацию полей ввода данных для указания на недостающую информацию;

- модуль для оптимизации размеров компонент исходя из условия баланса расходов, позволяющий осуществить значительную экономию средств и повысить эффективность системы;

- возможность создания пользовательских библиотек компонентов и подсистем, типичных для конкретной организации, включая возможность добавления изображений для визуального представления компонентов в модели;

- стационарное и нестационарное моделирование сжимаемой и несжимаемой среды с возможностью анализа теплообмена

- функция изменяемых параметров для параметрических исследований с использованием возможностей *FlowMaster* или посредством приложений других производителей.

- интуитивно понятный графический интерфейс, предоставляющий возможность ввода характерных данных, тем самым сокращающий вероятные ошибки, и повышающий точность результатов первое время;

- продвинутые инструменты визуализации проекта, в том числе возможность добавления фоновых изображений и возможность использования слоев для просмотра сложных систем;

– динамическая цветовая визуализация в режиме реального времени, показывающая изменения давления и скорости течений на графиках или путем изменения цвета компонентов;

– гибкие инструменты пост-процессинга позволяют сравнивать результаты различных вариантов расчета [242].

Программа «Гидросистема» [62] предназначена для проведения тепловых и гидравлических расчетов, а также выбора диаметров трубопроводов, перекачивающих жидкие или газообразные продукты, а также газо-жидкостные смеси.

Программа производит несколько видов расчетов:

– гидравлический расчет изотермического течения (без расчета изменения температуры продукта);

– проектный расчет (выбор диаметров);

– теплогидравлический расчет (с расчетом изменения температуры продукта и теплопотерь в окружающую среду);

– расчет переходных процессов (гидроудара).

В частности модуль расчета гидроудара позволяет проводить расчет переходных процессов (гидравлического удара) в произвольных трубопроводах, транспортирующих жидкие продукты, вызванных событиями закрытия и открытия арматуры, останова и запуска насосов, и различными их сочетаниями. Модуль позволяет пользователю понять характер переходного процесса и оценить опасность возможного разрушения трубопровода и возникновения кавитации. Начальное установившееся течение рассчитывается с помощью расчета изотермического течения (поверочного или проектного) или теплогидравлического расчета. Рассчитываются и выводятся в динамике (в том числе на расчетной схеме трубопровода) давления, напоры, расходы и скорости продукта, а также максимальные и минимальные значения давления за рассчитанное время.

Cassandra [123] - это программный комплекс моделирования гидродинамических процессов в сложных, разветвленных трубопроводных системах.

При моделировании процессов в участках трубопроводов учитываются следующие факторы:

- распределённость параметров течения по длине трубопроводов;
- влияние гидростатического давления в зависимости от профиля трассы;
- возможность возникновения самотечных участков;
- нелинейная зависимость потерь давления от скорости течения жидкости.

При моделировании работы регуляторов реализован ПИД алгоритм управления.

При моделировании работы насосов используются реальные напорные и мощностные характеристики.

При моделировании местных сопротивлений используется квадратичная зависимость перепада давления от расхода.

Программа позволяет пользователю в интерактивном режиме создавать и редактировать расчетную схему моделируемой системы.

Для этого в программе предусмотрен режим Построения, находясь в котором пользователь из набора элементов (участков трубопроводов, развилок, запорных вентилей, насосов, обратных клапанов, резервуаров, регуляторов) может собрать расчетную схему любой трубопроводной системы.

Набор расчетных элементов может быть дополнен новыми элементами. Помимо элементов гидравлической схемы в режиме Построения пользователь может поместить на схему средства отображения результатов моделирования (датчики).

Собрав расчетную схему, пользователь переходит в режим настройки математической модели, в котором ему предоставляется возможность внести

геометрические и конструктивные характеристики элементов, задать определяемые параметры для регуляторов, осуществить привязку датчиков к рассчитываемым параметрам. Датчики могут быть настроены практически на любой параметр, это может быть и давление (или скорость, или расход) в каком-либо сечении трубопровода, и перепад давления на насосе или задвижке, или положение привода регулятора.

Помимо отображения результатов моделирования на экране реализована возможность сохранения данных в файл.

Программный комплекс *Cassandra* представляет собой инструмент, обеспечивающий пользователя возможностью построения математических моделей гидравлических трубопроводных систем различной топологии. На основе модели пользователь может проводить расчеты как стационарных, так и нестационарных процессов в таких системах, осуществлять анализ влияния характеристик отдельных элементов на характеристики системы в целом.

Средства отображения результатов расчета позволяют проводить анализ максимальных давлений во время переходного процесса, осуществлять анализ влияния характеристик отдельных элементов на характеристики системы в целом. Результаты расчета могут быть отображены графически, сохраняться в файлах. В программе есть интегрированный OPC-сервер для возможного взаимодействия гидравлической модели с другими системами в процессе расчета.

В расчетах учитываются распределённость давления и расхода жидкости вдоль трубопровода, связанная со сжимаемостью жидкости, распределенные потери на трение, влияние на течение жидкости профиля местности, по которой проложен трубопровод, процессы, связанные с изменением и транспортом состава и свойств жидкости, наличие противотурбулентных присадок. Кроме того, в расчетах учитывается возможность возникновения самотечных участков при снижении давления на линейном участке ниже давления насыщенных паров. В программе представлены различные модели гидравлического трения, модели нестационарного трения, некоторые эмпирические модели,

полученные в процессе многолетнего опыта работы с математическими моделями трубопроводов и сравнения результатов расчета с реальными измерениями.

Однако, несмотря на все её достоинства, программа Cassandra не способна работать и отображать результаты вычислений в режиме реального времени [123].

SimHydraulics [272] – модуль моделирования гидравлических процессов, входящий в библиотеку моделирования физических систем Simscape в пакете математических вычислений MATLAB. Библиотека Simscape построена на базе технологии Simulink. В её основе лежит принцип визуального программирования: модель выстраивается путем соединения стандартных библиотечных, либо создаваемых пользователем виртуальных блоков. Каждый блок представляет собой модель физического объекта (электрического, гидравлического, механического и т. д.) или явления и описывается соответствующими уравнениями, как алгебраическими, так и дифференциальными. Большинство блоков имеет настраиваемые рабочие параметры. Исследованию возможностей моделирования нестационарных гидродинамических процессов режимов с применением этого программного инструмента посвящено множество работ, в том числе [246], [247], [248], [278].

Ключевые особенности Matlab/SimHydraulics:

- обширные стандартные библиотеки, включающие модели насосов, включая центробежные, струйные и аксиально-поршневые модели направляющих клапанов, включая запорные клапаны и общие конфигурации для 2-х, 4-х, и 6-и путевых гидрораспределителей, модели клапанов для управления потоком и давлением, включая шаровые, тарельчатые клапаны и клапаны сброса давления модели поступательных и вращательных приводов, включающие опционально дополнительные силы трения и центробежные силы модели резервуаров и труб с эффектами подъёма для моделирования систем транспортировки жидкости;
- настраиваемая библиотека типичных гидравлических жидкостей;

- поддержка генерации С кода;
- возможность расширения библиотеки новыми компонентами при помощи языка Simscape;
- при расчетах моделей Simscape используются численные методы решения дифференциальных и алгебраических уравнений, входящих в оператор системы. Пользователь имеет возможность настраивать параметры интегрирования: выбирать решатель с фиксированным или переменным шагом;
- существует возможность использовать модель в режиме реального времени.
- модельно-ориентированное проектирование;
- оценка параметров модели по данным измерений при помощи Simulink Design Optimization и подбор параметров системы по программно-задаваемым требованиям;
- автоматическая настройка ПИД-регуляторов и систем управления с произвольной архитектурой;
- разработка систем принятия решений, систем диспетчеризации, конечных автоматов, событийных систем при помощи инструмента Stateflow;
- быстрое прототипирование системы управления либо объекта управления для проверки системы на реальном объекте при помощи Simulink Real Time и оборудования Speedgoat;
- автоматическая генерация производственного кода на целевой платформе [275].

Из перечисленных программных продуктов наиболее интересен для исследования возможностей, модификации и последующего применения в задачах моделирования процессов в магистральном нефтепроводе пакет Matlab/SimHydraulics. Причины выбора этого продукта заключаются в следующем:

- 1) доступность пакета как для образовательных и научных учреждений, так и для нефтетранспортных предприятий;

2) наличие дополнительных возможностей (библиотек), позволяющих существенно расширить инструментарий разработчика и функциональность моделей;

3) постоянное развитие пакета, обусловленное широким его распространением и успешностью компании-разработчика.

Настоящий раздел диссертации посвящен анализу возможностей пакета Matlab/SimHydraulics при построении моделей составных элементов магистрального нефтепровода, с учетом особенностей объекта моделирования и задач, стоящих перед инженерами и исследователями. В частности, исследуются возможности построения моделей установившихся режимов течения, а также неустойчивых режимов течения, построенных в Matlab/SimHydraulics. Предлагаются модификации стандартных средств построения моделей гидравлических процессов, представленных в указанном пакете, для учета системы расчета коэффициента гидравлического сопротивления, контроля над распределенными гидравлическими параметрами и учета величины скорости распространения волн давления в трубопроводе [138].

7.2. Использование Matlab/SimHydraulics для построения модели установившихся режимов работы магистрального нефтепровода

Модель гидравлической системы в Matlab/SimHydraulics представляет собой комплекс взаимосвязанных графических объектов, выбор и соединение которых друг с другом осуществляется пользователем с помощью специального графического интерфейса. Блоки ставятся в соответствие различным гидравлическим элементам: трубам, клапанам, тройникам, насосам и т. д. Совокупность взаимосвязанных блоков интерпретируется пакетом и представляется в виде вычислительного алгоритма решения соответствующей системы уравнений, описывающей процессы в созданной гидравлической схеме.

Для расчета установившегося режима течения однородной несжимаемой жидкости в трубопроводе используют уравнение Бернулли [198]:

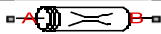


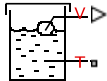
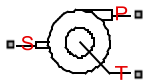
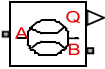
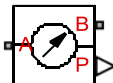
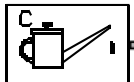

$$\begin{cases} \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) = \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + h_m, \\ v_1 = v_2 = \frac{4Q}{\pi d^2}, \end{cases} \quad (7.1)$$

где Q – объемный расход жидкости; L – длина участка трубопровода; p_1 и p_2 – давления в начале и конце трубопровода соответственно; v_1 , v_2 , v – скорость течения жидкости на участке трубопровода в начальном, конечном сечениях и на всей его протяженности; z_1 и z_2 – геодезические отметки трубопровода; d – диаметр трубопровода; $\lambda(\text{Re}, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\varepsilon = \Delta/d$ – относительная шероховатость; Δ – абсолютная шероховатость; g – ускорение свободного падения $h_m = \sum_k \zeta_k \cdot \frac{v^2}{2g}$ – потери напора на местных сопротивлениях, где $\sum_k \zeta_k$ – сумма местных сопротивлений для рассматриваемого участка; ρ – плотность перекачиваемой жидкости.

Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda(\text{Re}, \varepsilon)$ можно вычислить, используя формулы из таблицы 6.1.

Возможность моделирования установившихся (стационарных) режимов течения в магистральных трубопроводах ранее обсуждалась в [33]. В Matlab/SimHydraulics процессы, описываемые уравнением Бернулли, могут быть отображены соответствующей моделью, содержащей визуальные блоки (таблица 7.1) [33].

Таблица 7.1. Основные блоки Simscape, используемые для построения модели в соответствии с уравнением Бернулли

Название блока	Графическое изображение блока
1	2
<i>Hydraulic_Resistive_Tube</i>	
<i>Hydraulic_Constant_Pressure_Source</i>	
<i>Hydraulic_Constant_Flow_Rate_Source</i>	
<i>Variable_Head_Tank</i>	
<i>Centrifugal_Pump</i>	
<i>Hydraulic_Flow_Rate_Sensor</i>	
<i>Hydraulic_Pressure_Sensor</i>	
<i>Custom_Hydraulic_Fluid</i>	
<i>Hydraulic_Reference</i>	

Блок *Hydraulic_Resistive_Tube* [251] учитывает падение давления из-за гидравлического сопротивления и разности геодезических отметок трубы и потери напора на местных сопротивлениях. Соответствующие формулы расчета коэффициента гидравлического сопротивления представлены в таблице 7.2 [23].

Таблица 7.2. Соответствие вида эмпирической зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от диапазона числа Рейнольдса в системе SimHydraulics

Режим течения жидкости	Гидравлическое сопротивление при соответствующем режиме течения жидкости	Диапазон значений числа Рейнольдса для соответствующего режима течения
Ламинарный	$f = K_s / \text{Re}$,	$\text{Re} \leq \text{Re}_L$,
Переходный	$f = f_L + \frac{f_T - f_L}{\text{Re}_T - \text{Re}_L} (\text{Re} - \text{Re}_L)$,	$\text{Re}_L < \text{Re} < \text{Re}_T$,
Турбулентный	$f = \left(-1.8 \log_{10} \left(\frac{6.9}{\text{Re}} + \frac{r/D_H}{3.7} \right)^{1.11} \right)^{-2}$	$\text{Re} \geq \text{Re}_T$.

В таблице 7.2 приняты следующие обозначения: r – абсолютная шероховатость; D_H – внутренний диаметр трубопровода; K_s – коэффициент, характеризующий сечение трубы (для круглого сечения всегда $K_s = 64$); Re_L и Re_T – числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах соответственно, по умолчанию $\text{Re}_L = 2000$, а $\text{Re}_T = 4000$; f_T и f_L – коэффициенты трения при турбулентном и ламинарном режимах соответственно.

Блоки *Hydraulic_Constant_Pressure_Source* [250] и *Hydraulic_Constant_Flow_Rate_Source* [249] являются источниками постоянного давления и объемного расхода соответственно. Используя эти блоки можно задать давление в начале и конце трубопровода, а также указать объемный расход.

Блок *Custom_Hydraulic_Fluid* [240] описывает свойства перекачиваемой жидкости, её плотность вязкость, коэффициент сжимаемости и коэффициент содержания воздуха.

Variable_Head_Tank [280] – модель резервуара, позволяющая имитировать изменяющийся уровень взлива жидкости в результате слива/налива жидкости из резервуара. Блок также оснащен портом для мониторинга объема жидкости в резервуаре.

Используя возможности языка описания физических моделей Simscape [273], создан блок *My_Resistive_Tube* (рисунок 7.1), осуществляющий расчет коэффициента гидравлического сопротивления в соответствии с формулами, взятыми из таблицы 6.1, т. е. с использованием соотношений, принятых в российских справочных и нормативных источниках, например [198].



Рисунок 7.1. Блок *My_Resistive_Tube*

Для тестирования созданного блока *My_Resistive_Tube* на вычислительной задаче, рассмотрим следующий пример. Бензин с плотностью $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$ и вязкостью $\nu = 25 \text{ сСт}$ перекачивают по нефтепродуктопроводу ($L = 140 \text{ км}$, $D = 530 \times 7 \text{ мм}$, $\Delta = 0,2 \text{ мм}$; $z_H = 50 \text{ м}$, $z_K = 100 \text{ м}$) при этом давление в начале трубопровода составляет 55 атм., а в конце – 3 атм. Требуется определить расход жидкости в трубопроводе. Создадим модель для решения задачи, основанной на уравнении Бернулли, в пакете Matlab/SimHydraulics (рисунок 7.2).

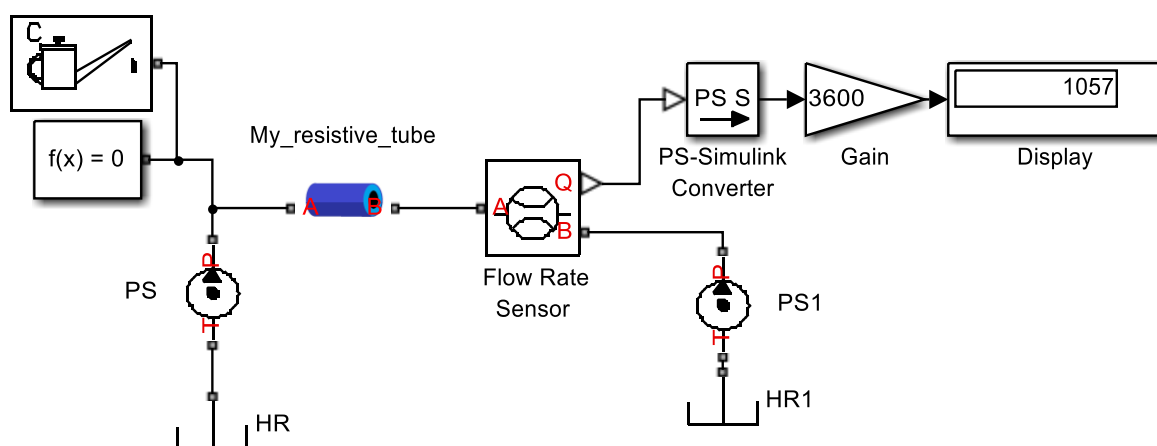


Рисунок 7.2. Модель для расчета установившегося режима течения жидкости на участке трубопровода в пакете Matlab/SimHydraulics

В рассмотренном примере источники давления *PS1* и *PS* создают давление величиной 55 атм и 3 атм соответственно. Блок *My_resistive_tube* учитывает падение давления из-за гидравлического сопротивления, разности геодезических отметок трубы и потери напора на местных сопротивлениях. Блок *PS-Simulink_Converter* переводит физический сигнал в безразмерную величину. *Gain* умножает выходной сигнал на 3600 (перевод из м³/с в м³/ч). *Display* выводит значение расхода. Поскольку производится расчет установившегося режима, то для вывода решения достаточно использовать блок *Display*, осуществляющий вывод значения величины расхода жидкости. Таким образом, в результате вычислений расход жидкости составил 1057 м³/ч, что соответствует аналитическому решению поставленной задачи.

7.3 Анализ возможностей Matlab/SimHydraulics при моделировании неустойчившихся процессов в трубопроводе

Неустойчившимися процессами в нефтепроводе называются такие процессы, в которых характеристики потока нефти изменяются не только от сечения к сечению, но и в каждом сечении в зависимости от времени. Среди изменяющихся характеристик необходимо назвать процессы изменения

давления $p = p(x,t)$ и расхода $Q = Q(x,t)$ в трубопроводе, которые представлены функциями двух переменных: времени t и координаты сечения x .

Неустановившиеся процессы в трубопроводах возникают при пусках и остановках перекачки, включении и отключении отводов, работе запорной и регулирующей арматуры, а также при различных авариях – разрывах трубы и закупорках.

Для слабо сжимаемых жидкостей, каковыми является нефть [64] и нефтепродукты, неустановившиеся течения при полном заполнении трубопровода жидкостью описываются дифференциальными уравнениями с частными производными [119]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_0 v(x,t)}{2} - \rho_0 g \cdot \sin \alpha(x) = 0, \end{cases} \quad (7.2)$$

где $p(x,t)$ – давление; $v(x,t)$ – скорость течения жидкости; ρ_0 – плотность жидкости; c – скорость распространения звука в трубопроводе; g – ускорение свободного падения; $\alpha(x)$ – угол наклона оси трубопровода к горизонту в сечении x .

Система дифференциальных уравнений (7.2) решается при начальных условиях, характеризующих распределение давления $p(x,0)$ и скорости течения $v(x,0)$ в начальный момент времени $t=0$; краевыми условиями, отражающими процессы на концах $x=0$ и $x=L$ трубопровода, а также условиями сопряжения.

В пакете SimHydraulics дифференциальные уравнения вида (7.2) входят в модель, создаваемую средствами визуального моделирования [26]. А именно, для описания неустановившегося течения жидкости в сегменте трубы в SimHydraulics служит стандартный блок *Segmented_Pipeline* (рисунок 7.3а). Блок представляет собой последовательность сегментов, каждый из которых

состоит из совокупности следующих блоков: *Hydraulic_Resistive_Tube* [251], *Fluid_Inertia* [244] и *Constant_Volume_Hydraulic_Chamber* [239] (рисунок 7.3 б).

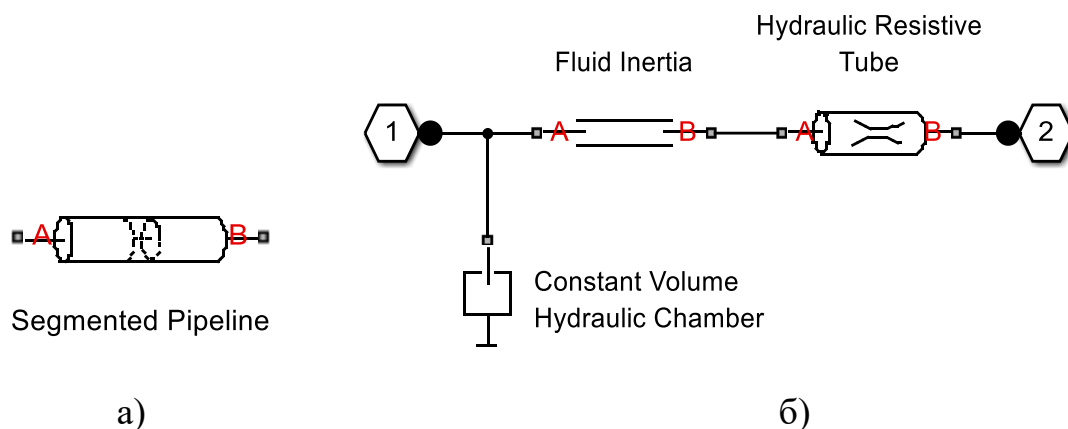


Рисунок 7.3 – Графическое изображение стандартного блока *Segmented_Pipeline* (а) и эквивалентная схема входящего в него сегмента (б)

Для придания устойчивости вычислительному процессу при использовании блока *Segmented_Pipeline* к последовательности одинаковых сегментов (рисунок 7.3 б) последовательно добавляются еще два блока: *Hydraulic_Resistive_Tube* и *Fluid_Inertia*. В совокупности это образует структуру стандартного блока *Segmented_Pipeline* (рисунок 7.4).

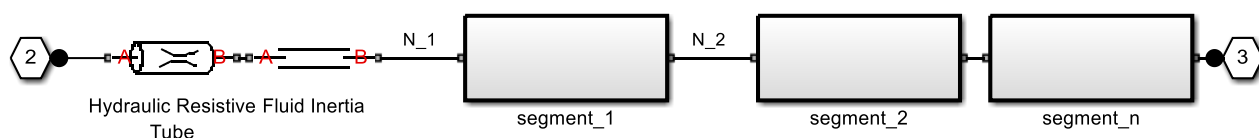


Рисунок 7.4 - Эквивалентная схема блока *Segmented_Pipeline*

Блок *Hydraulic_Resistive_Tube* здесь учитывает падение давления из-за гидравлического сопротивления. При этом применяются формулы расчета коэффициента гидравлического сопротивления из таблицы 7.2.

Блок *Fluid_Inertia* описывает инерционные свойства жидкости в соответствии с соотношением [244]:

$$p = \rho \frac{L}{A} \cdot \frac{dQ}{dt}, \quad (7.3)$$

где p – разница давлений в начальном и конечном сечениях сегмента трубопровода; L – длина сегмента трубы; Q – объемный расход; ρ – плотность жидкости; A – площадь сечения трубопровода; t – время.

Блок *Constant_Volume_Hydraulic_Chamber* учитывает сжимаемость жидкости и связанные с ней эффекты в соответствии с соотношениями [239]:

$$\begin{cases} V_f = V_c + \frac{V_c}{E} p, \\ q = \frac{dV_f}{dt}. \end{cases} \quad (7.4)$$

где V_f – объем жидкости в трубе; V_c – геометрический объем трубы; E – объемный модуль упругости. Если рассчитанное с использованием модели значение давления меньше нуля, то это соответствует случаю, когда вместо жидкости возникает смесь жидкости и газа, и объемный модуль упругости в (7.4) вычисляется следующим образом [239]:

$$E = E_l \frac{1 + \alpha \left(\frac{p_a}{p_a + p} \right)^{1/n}}{1 + \alpha \frac{p_a^{1/n}}{n(p_a + p)^n} E_l}, \quad (7.5)$$

где E_l – объемный модуль чистой жидкости; n – отношение теплоемкостей; p_a – атмосферное давление.

Блок *Constant_Volume_Hydraulic_Chamber* также учитывает деформацию трубы при больших давлениях с использованием соотношений [239]:

$$V_c = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L, \quad d(s) = \frac{K_p}{1 + \tau s} p(s), \quad (7.6)$$

где K_p – модуль Юнга материала трубы.

Рассмотрим решение одной задачи моделирования неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе. Построим модель участка трубопровода со следующими параметрами: $L = 2000$ м, $D = 500$ мм, $\delta = 7$ мм, плотность и упругость жидкости возьмем из предыдущего примера. Жидкость в

начальный момент времени покоилась, давление в крайних сечениях участка трубопровода было принято одинаковым и равным 3 атм. Затем в начале трубопровода давление ступенчатым образом увеличивается. Для построения модели используем *Segmented_Pipeline* (рисунок 7.5).

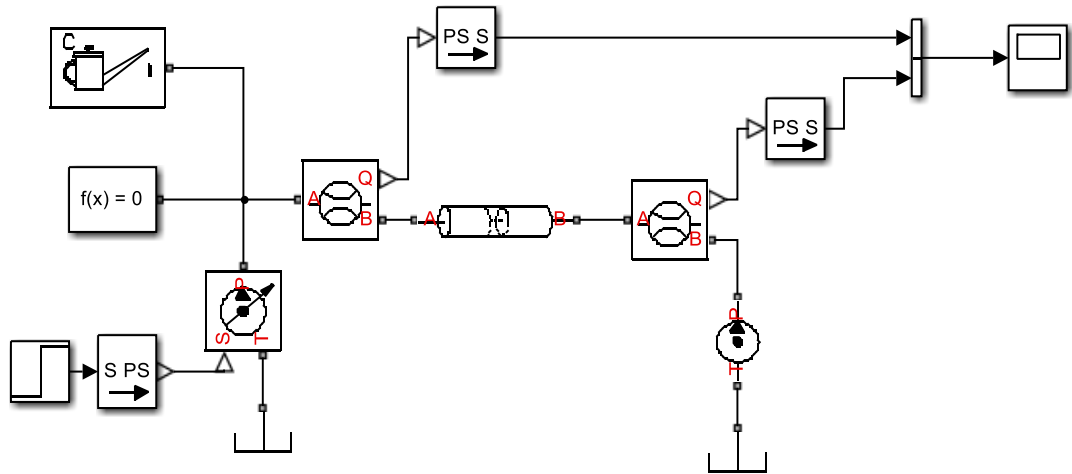


Рисунок 7.5. Модель участка трубопровода

Зависимость расхода от времени в начальном и конечном сечениях трубопровода по результатам построения модели представлена на рисунке 7.6 [5].

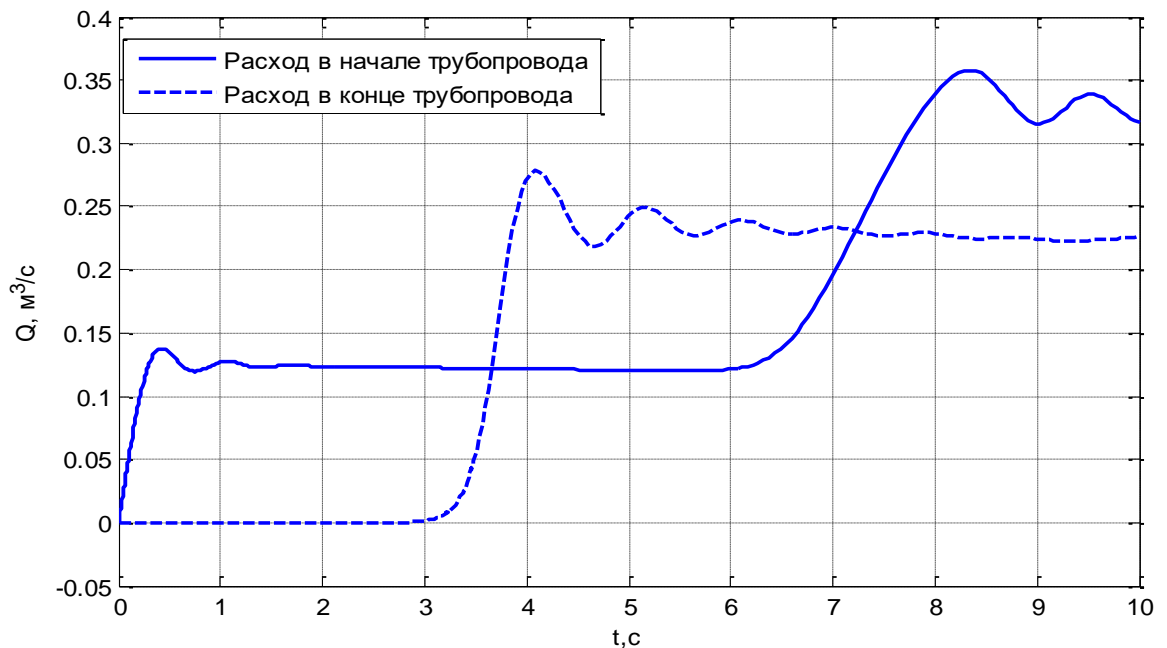


Рисунок 7.6. Зависимость расхода от времени в начальном и конечном сечениях участка трубопровода

Предложим две модификации описанного блока *Segmented_Pipeline*.

Первая из них связана с уточнением алгоритма расчетов деформации трубы. В методиках расчетов, принятых в российских компаниях, деформация трубы рассчитывается по формуле [198]:

$$\Delta d = \frac{d_0^2}{2E\delta}(p_1 - p_0), \quad (7.7)$$

где d_0 – внутренний диаметр трубы; $(p_1 - p_0)$ – разность внутреннего и внешнего давлений; E – модуль Юнга материала трубы; δ – толщина стенки трубы.

Предложим модификацию блока *Constant_Volume_Hydraulic_Chamber*, которая позволит рассчитывать деформацию трубы в зависимости от давления согласно (7.7). На рисунке 7.7 изображено условное обозначение нового блока *My_Chamber* взамен существующего *Constant_Volume_Hydraulic_Chamber*.

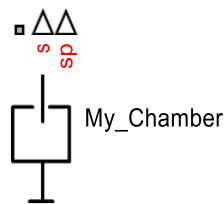


Рисунок 7.7. Блок *My_Chamber*

Пример учета эффекта изменения внутреннего диаметра трубопровода в зависимости от давления в модели с применением блока *My_Chamber* представлен на рисунке 7.8.

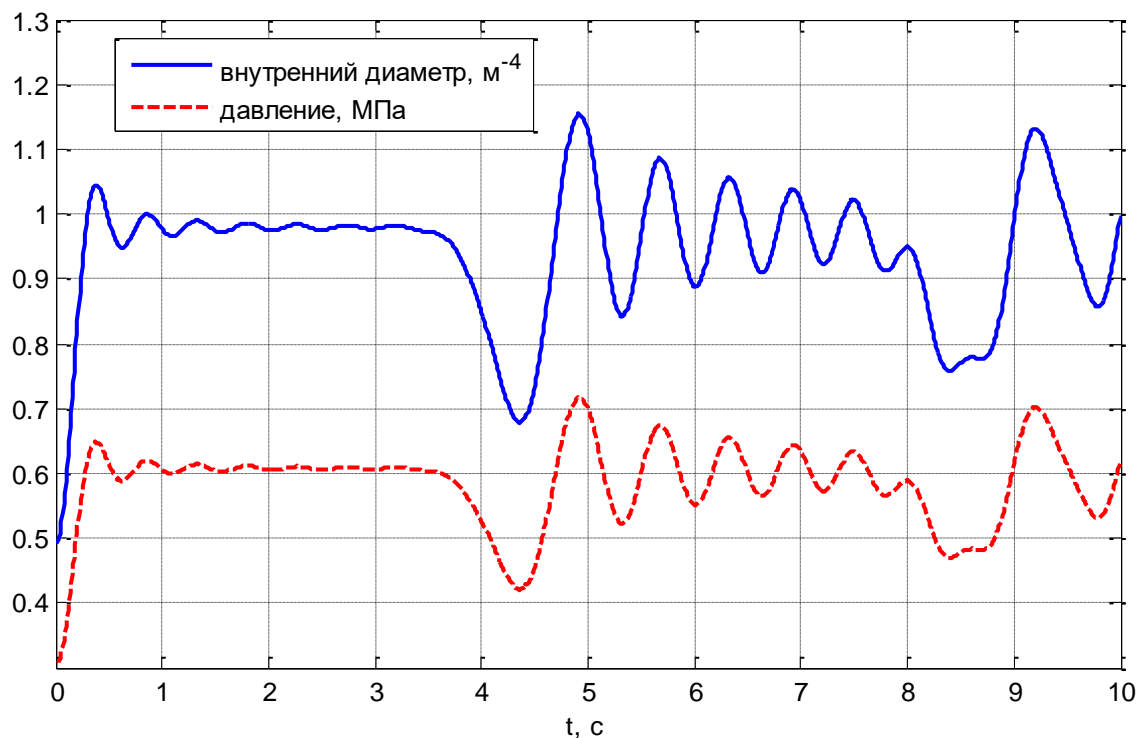


Рисунок 7.8. Результаты симуляции процесса изменения внутреннего диаметра участка трубопровода в зависимости от действующего давления

При использовании стандартных блоков в свойствах модели предусмотрено задание времени распространения волн возмущения, за которое волна преодолевает расстояние, равное длине участка трубы. Однако задание различных значений этого параметра в модели не позволяло получить адекватный результат [33], [5]. Использование модифицированного блока *Mu_Chamber*, позволяющего скорректировать описание деформационных процессов в модели сегмента трубы, устраняет этот недостаток [26].

Вторая модификация стандартного блока *Segmented_Pipeline* связана с решением проблемы визуализации распределенных процессов в модели. Блок *Segmented_Pipeline*, который используется в пакете Matlab/SimHydraulics для построения моделей распределенных процессов, происходящих в трубопроводе, не предоставляет возможность получения информации о характере распределении по длине трубопровода давления и расхода. Для доступа к такой информации необходимо составить эквивалентную модель,

которая представляет собой последовательное соединение из нескольких повторяющихся сегментов труб. Для контроля распределенных процессов в трубопроводе предлагается разместить виртуальные датчики давления и объемного расхода на границах сегментов модели (рисунок 7.9) [26].

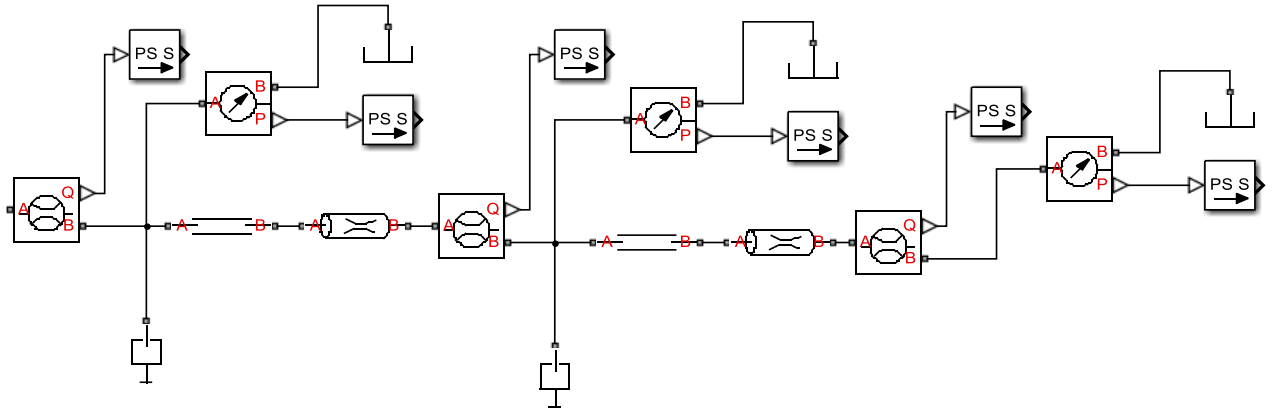


Рисунок 7.9. Модель последовательного соединения труб, оснащенная виртуальными датчиками давления

Модель, приведенная на рисунке 7.9, может быть реализована пользовательским блоком-маской. Составим из стандартных блоков и блоков, аналогичных стандартным, маску *My_Segmented_Pipeline* (рисунок 7.10).

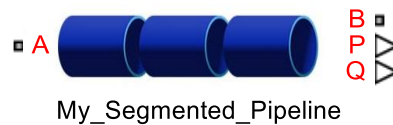


Рисунок 7.10. Графическое обозначение модифицированного блока-маски *My_Segmented_Pipeline*

Среди параметров блока *My_Segmented_Pipeline* необходимо назвать следующие:

- вектор значений координат участка трубопровода, в которых установлены датчики давления;

- вектор высотных отметок линейного участка трубопровода, соответствующий местам установки датчиков давления;
- модуль Юнга материала трубопровода,
- скорость распространения волн давления,
- диаметр трубопровода,
- абсолютная шероховатость внутренней стенки трубопровода.

Выходные порты Q и P служат для отслеживания значений объемных расходов и давлений соответственно в каждом сечении, где установлены соответствующие датчики. Порты A и B являются гидравлическими и служат для соединения с другими блоками гидравлических элементов модели.

Важной характеристикой блока *My_Segmented_Pipeline* является функция масштабирования, то есть варьирования количества сегментов в модели трубопровода. В блоке с применением средства *Simscape Language* была реализована возможность изменения количества сегментов, задавая значение соответствующей переменной.

Таким образом, предложив модифицированный блок *My_Segmented_Pipeline* в Matlab/SimHydraulics, мы внедрили возможность отслеживать распределение гидравлических параметров с заданным шагом по координате x . Следовательно, для пользователя был предоставлен доступ к инструментам отображения гидравлических распределенных параметров на трехмерных графиках.

С применением предложенных модификаций средствами Matlab/SimHydraulics [5] построена модель участка трубопровода со следующими параметрами: $L = 2000$ м, $D = 500$ мм, $\delta = 7$ мм. Жидкость в начальный момент времени покоится, давление на концах трубопровода также принято одинаковым и равным 3 атм. Затем в начальном сечении участка трубопровода давление скачкообразно увеличивается на 1 атм. Зависимости расхода и давления от времени и координаты сечения для описанного примера при использовании модифицированных блоков изображены на рисунке 7.11 [26].

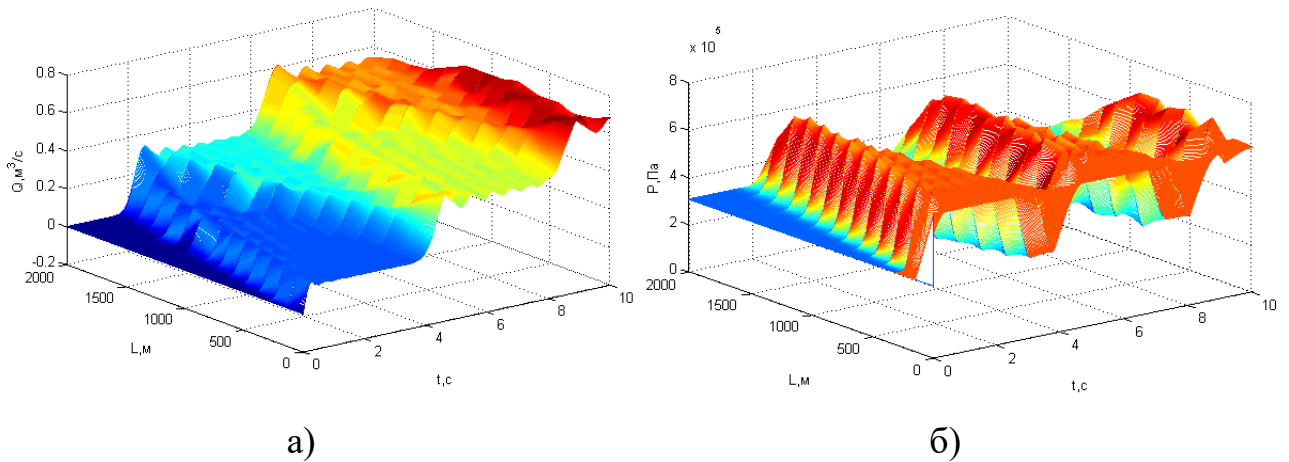


Рисунок 7.11. Отображение результатов моделирования в трехмерных проекциях: а – расход, рассчитанный с помощью модели с модифицированным блоком *My_Segmented_Pipeline*; б – давление, рассчитанное с помощью модели с блоком *My_Segmented_Pipeline*

Таким образом, с применением модифицированных блоков библиотеки SimHydraulics пользователь получил возможность корректного учета важных параметров модели, включая скорость распространения волн давления, а также инструменты визуализации распределенных процессов на участке трубопровода.

7.4 Учет теплообменных процессов в моделях магистральных нефтепроводов в пакете Matlab/Simscapе

Распределение температуры нефти или нефтепродукта вдоль профиля трубопровода $\frac{dT}{dx}$, имеющего плотность ρ , в стационарном режиме перекачки определяется формулой В.Г. Шухова [119]:

$$GC_v \frac{dT}{dx} = \pi K d (T_{нар} - T), \quad (7.8)$$

где $T_{нар}$ – наружная температура; G – массовый расход жидкости; C_v – удельная теплоемкость; d – внутренний диаметр трубопровода; K –

коэффициент теплопередачи от жидкости, текущей в трубопроводе, к окружающей среде.

Если помимо теплопередачи от нагретой жидкости в окружающую среду рассматривается также выделение тепла в вязкой жидкости за счет сил внутреннего трения её слоев друг от друга (диссипативный разогрев), формула Шухова представляется в виде:

$$GC_v \frac{dT}{dx} = \pi K d (T_{нар} - T) + G g i, \quad (7.9)$$

где i – коэффициент гидравлического уклона; g – ускорение силы тяжести.

Изменение кинематической вязкости ν (м²/с) нефтей [64] и нефтепродуктов в зависимости от температуры T (°С) можно рассчитать по формуле Рейнольдса-Филонова [119]:

$$\nu(T) = \nu_1 \cdot e^{-k(T-T_1)}, \quad (7.10)$$

где ν_1 – вязкость жидкости при температуре T_1 , а коэффициент k (1/°С) зависит от индивидуальных свойств жидкости. Для определения k достаточно знать вязкость ν_2 жидкости хотя бы еще при одном значении T_2 температуры:

$$k = \frac{\ln(\nu_1/\nu_2)}{T_2 - T_1}. \quad (7.11)$$

Для расчета плотности в зависимости от температуры используется следующая формула:

$$\rho(T) = \rho_{20} [1 + \xi(20 - T)], \quad (7.12)$$

где ξ – коэффициент объемного расширения; T – температура; ρ_{20} – плотность жидкости при 20 °С [119].

Изменим блок *My_Hydraulic_Resistive_Tube*, чтобы помимо учета падения гидравлического сопротивления он так же производил бы учет теплообменных процессов согласно формулам (7.9) - (7.12). Тогда гидродинамические процессы сегмента трубы будут рассчитываться при начальных (задаваемых в качестве параметров) реологических свойствах жидкости (ρ_0 , ν_0), которые соответствуют температуре в начале данного участка сегмента T_0 . В последнем

блоке сегмента *My_Hydraulic_Resistive_Tube* значение температуры будет пересчитываться согласно формуле (7.9), будут меняться модельные значения плотности и вязкости в зависимости от температуры в соответствии с формулами (7.9) - (7.12). Полученные конечные реологические свойства являются начальными для следующего сегмента. При изменении температуры в начале трубопровода изменение свойств жидкости температуры в соответствующем участке трубопровода будет распространяться с задержкой, равной величине τ :

$$\tau = \frac{L}{v}, \quad (7.13)$$

где L – длина участка трубопровода; v – скорость течения жидкости в соответствующем участке.

Для иллюстрации результатов построим две модели трубопровода: учитывающую и не учитывающую изменение реологических свойств нефти с изменением её температуры. Приняты следующие параметры трубопровода: $L = 100$ км, $D = 1000$ мм, $\Delta = 0,2$ мм. По трубопроводу перекачивается нефтепродукт со следующими реологическими характеристиками: плотность $\rho_{20} = 850$ кг/м³, вязкость при температуре $\nu_{20} = 40$ сСт, $\nu_{70} = 5,3$ сСт. Перекачка осуществляется с расходом 1,5 м³/с, давление в конце трубопровода 2 атм. Температура начального подогрева $T_0 = 65$ °С, температура грунта $T_{нар} = 8$ °С, коэффициент теплопередачи K равен 1,25 Вт/(м²·°С). Представим зависимости давлений от координаты сечения на рисунке 7.12.

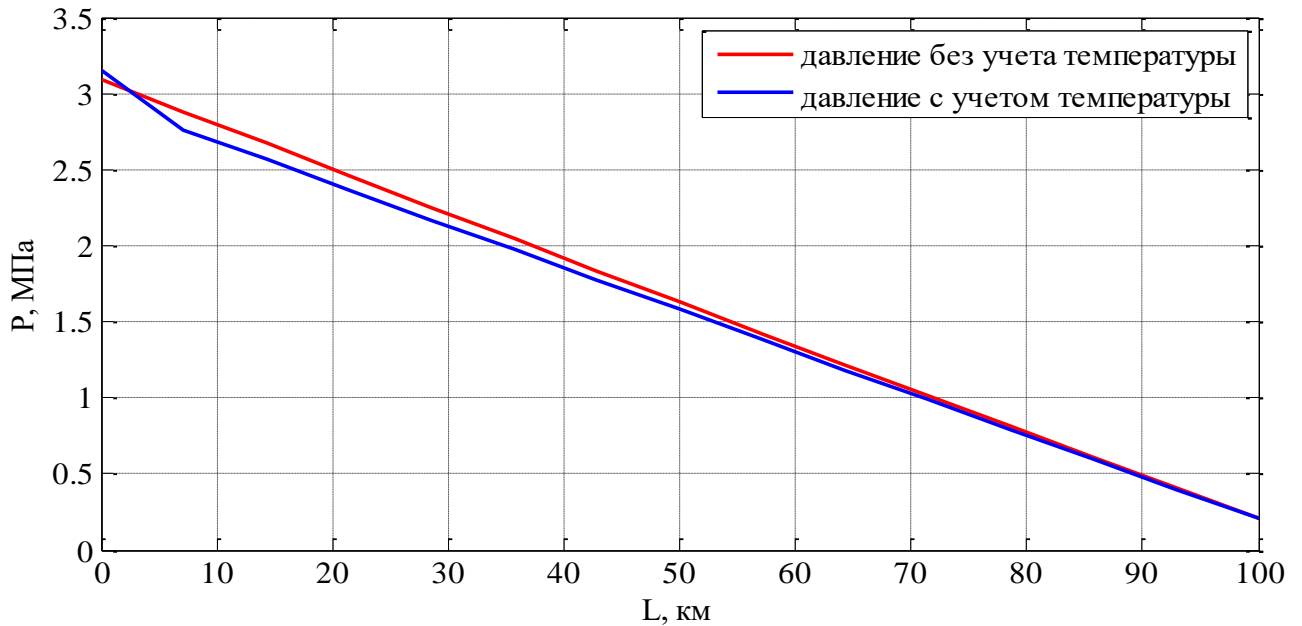


Рисунок 7.12. Зависимости давлений от координаты сечения

На рисунке 7.12 можно отметить расхождение значений давлений, полученных с помощью разных моделей. Наибольшая разница наблюдается в начале участка. По мере приближения к концу участка расхождение уменьшается из-за того, что давление в конце одинаковое в обеих моделях.

7.5 Модели насосных агрегатов и нефтеперекачивающих станций в Matlab/SimHydraulics

Важным вопросом при построении моделей участков магистрального трубопровода является учет граничных условий. В простейшем случае граничные условия задачи можно задавать с помощью стандартных блоков – источников постоянного давления, расхода или блоков, являющихся моделями резервуаров (рисунок 7.13).

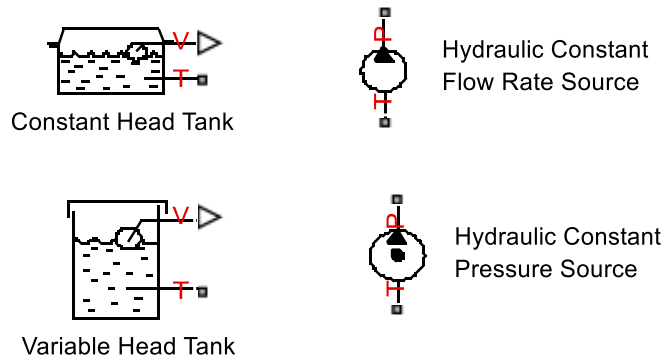


Рисунок 7.13. Блоки SimHydraulics для задания граничных условий

Также граничные условия задаются моделями насосов, представленными соответствующими блоками, например блоком *Centrifugal_Pump* [238], описывающим работу центробежного насоса. Действительно, *центробежный насос* [65] является основным типом насосов, используемых для перекачки нефти по магистральным трубопроводам.

Управляющим сигналом в модели насоса является частота вращения ротора [56]. Модель центробежного насоса в блоке *Centrifugal_Pump* имеет возможность настройки по экспериментальным данным для различных характеристик насоса: модель насоса на практике принято представлять в виде квадратической аппроксимации зависимости давления от подачи насоса с учетом плотности перекачиваемой жидкости и частоты вращения вала [198]:

$$p = \left(H_0 + a \cdot Q - b \cdot Q^2 \right) \frac{\omega}{\omega_{ном}} \rho g, \quad (7.14)$$

где p – давление насоса при подаче Q ; H_0 , a , b – эмпирические коэффициенты для аппроксимации характеристик насоса; ω – частота вращения вала ротора; $\omega_{ном}$ – частота вращения ротора, при которой производились испытания; g – ускорение силы тяжести; ρ – плотность перекачиваемой жидкости.

Энергетические характеристики насоса напрямую зависят от величины коэффициента полезного действия (КПД), который также принято аппроксимировать квадратичным полиномом [198]:

$$\eta = c_{OB} + c_{1B} \cdot Q + c_{2B} \cdot Q^2, \quad (7.15)$$

где η – КПД насоса при подаче Q ; c_{OB} , c_{1B} , c_{2B} – эмпирические коэффициенты для аппроксимации характеристик насоса, измеренных на воде.

Стандартная модель центробежного насоса в Matlab/SimHydraulics не предоставляет возможности учитывать КПД насоса в модели для расчета его энергопотребления. В работе предложена модификация блока для модели центробежного насоса [198], позволяющая рассчитывать его КПД, используя соотношение (7.15). Также модифицированная модель центробежного насоса учитывает изменение диаметра рабочего колеса в соответствии с соотношением [198]:

$$p = \left(H \left(\frac{\omega D}{\omega_0 D_0} \right)^2 + a \cdot Q \frac{\omega D}{\omega_0 D_0} - b \cdot Q^2 \right) g \rho, \quad (7.16)$$

где D – номинальный диаметр рабочего колеса; D_0 – измененный диаметр рабочего колеса.

Дополнительно создан блок, реализующий последовательное соединение четырех насосов [191] для моделирования нефтеперекачивающей станции. Графические представления стандартного блока, модифицированного *My_Pump* и модели НПС *My_Station* изображены на рисунке 6.14.

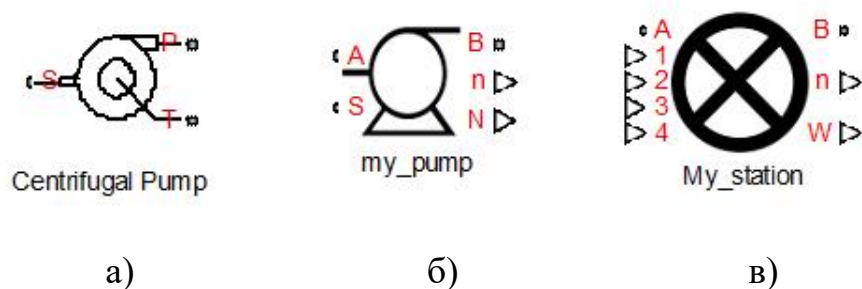


Рисунок 7.14. Графические представления стандартного блока для модели центробежного насоса (а), модифицированного блока (б) и последовательного соединения насосов для моделирования нефтеперекачивающей станции (в)

Существует несколько способов изменения характеристик насоса:

- обточка (изменение диаметра) рабочего колеса (учитывается в (7.14)),
- перепуск (байпасирование),
- дросселирование напорной стороны насоса.

Байпасирование в Matlab/SimHydraulics реализуется установкой модулей крана (рисунок 7.15 а) или обратного клапана (рисунок 7.15 б) между всасывающим и нагнетательным патрубками насоса.

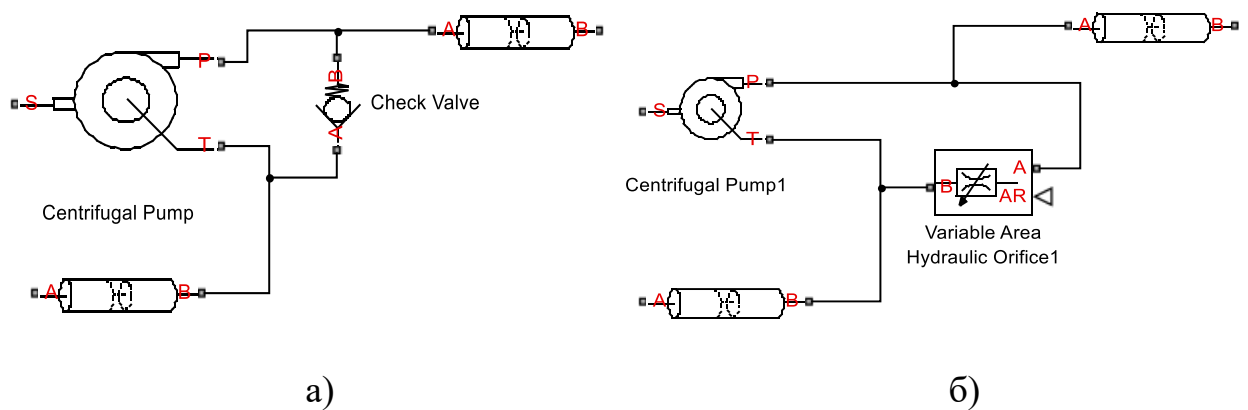


Рисунок 7.15. Байпасирование в Matlab/SimHydraulics: а – байпасирование посредством установки обратного клапана; б – байпасирование путем установки крана (задвижки)

Дросселирование в модели осуществляется установкой блока задвижки после нагнетательного патрубка насоса (рисунок 7.16).

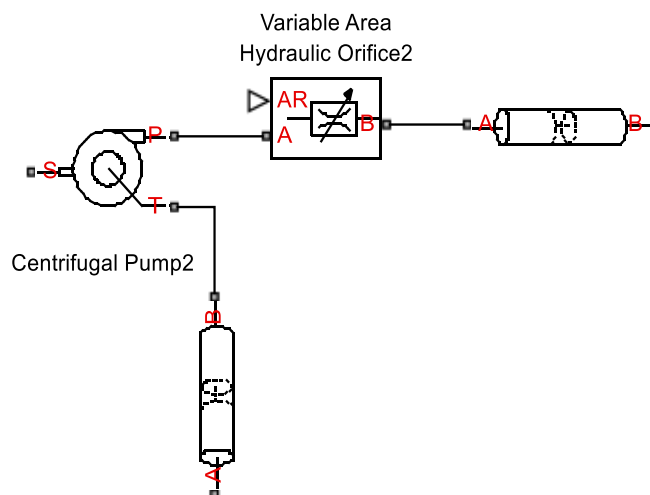


Рисунок 7.16. Модель дросселирования насоса в Matlab/SimHydraulics посредством установки задвижки

Схему магистрального нефтепровода можно подвергнуть декомпозиции и представить в виде структурной диаграммы участков, сооружений и других подсистем со связями между ними. Приведем пример структурной схемы фрагмента магистрального трубопровода в Matlab/SimHydraulics (рисунок 7.17).

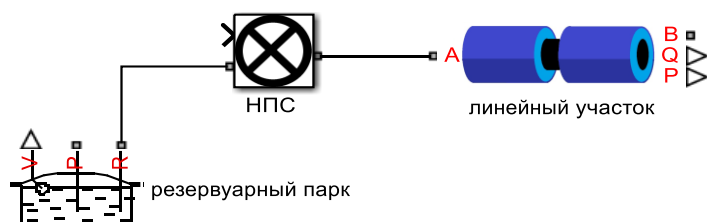


Рисунок 7.17. Структурная схема фрагмента магистрального трубопровода в Matlab/SimHydraulics, включающая блок насосных агрегатов НПС

Предложим модель запуска трубопровода (рисунок 7.18) ($L = 200$ км, $D = 530 \times 7$ мм, $\Delta = 0,2$ мм, $E = 1,9 \cdot 10^{11}$ Па). Начальная скорость принята равной нулю, начальное давление равно 3 атм.

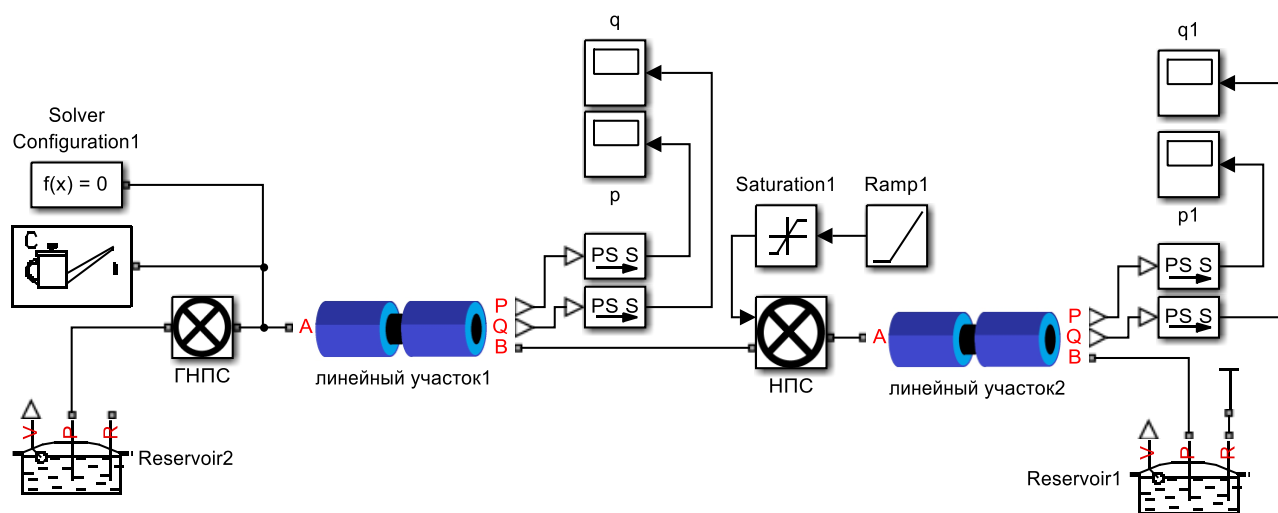


Рисунок 7.18. Модель трубопровода (верхний уровень)

Пусть головная нефтеперекачивающая станция (ГНПС) состоит из подпорного насоса 20НДсН-М и двух основных насосов НМ1250-260 соединенных последовательно (рисунок 7.19). Пусть давление на выходе ГНПС не должно превышать 6 МПа, поэтому на последнем насосе установлен байпас (открытая задвижка диаметром 200 мм). Через 100 км после ГНПС разместим НПС. НПС состоит из двух последовательно соединенных насосов НМ1250-260 (рисунок 7.20). Параметры жидкости: $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 25 \text{ сСт}$, $K = 1,4 \cdot 10^9 \text{ Па}$ (K – модуль сжимаемости жидкости). ГНПС запускается в момент начала симуляции, а НПС через 120 секунд. Моделирование запуска НПС осуществляется с помощью подачи управляющего сигнала, создаваемого блоками *Saturation1* и *Ramp1*. Давление в резервуарах принято равным 1 атм.

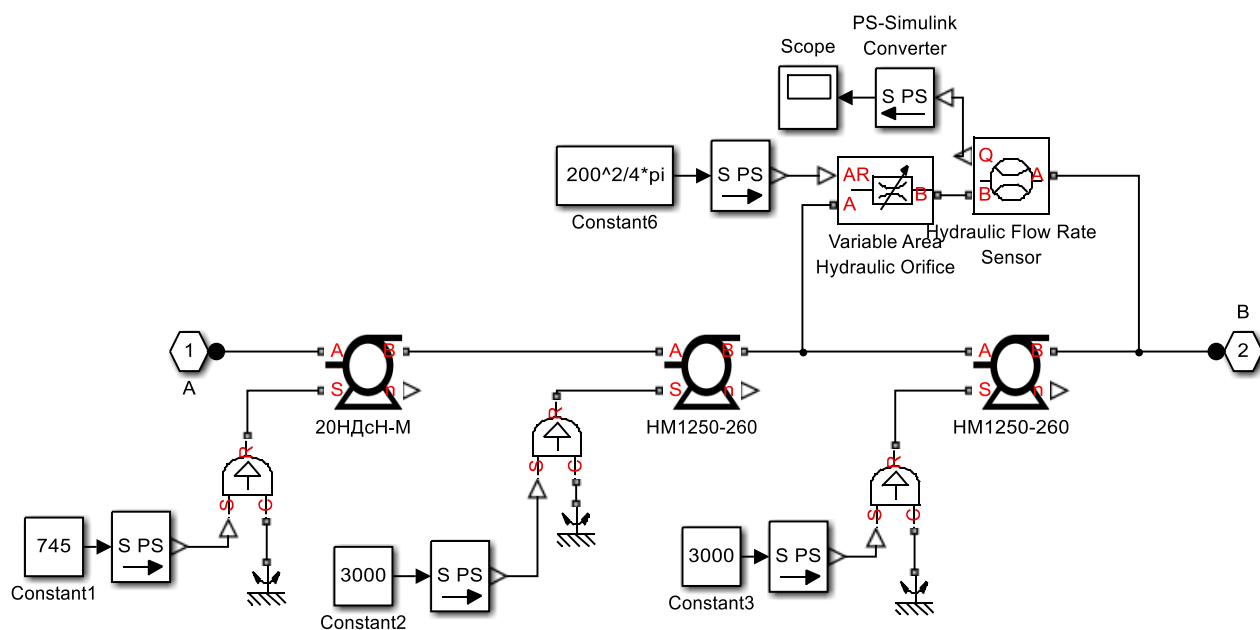


Рисунок 7.19. Модель ГНПС

На рисунке 7.19 нижние входные порты блоков насосов соединены с преобразователями *Ideal_Angular_Velocity_Source*, которые являются симуляторами механических элементов – источников вращательного движения для насосов. Модули *Simulink-PS Converter* (на рисунке обозначены как SPS)

переводят безразмерные значения *Constant* в физические сигналы, имеющие размерность скорости углового вращения, которые могут воспринимать блоки *Ideal_Angular_Velocity_Source*.

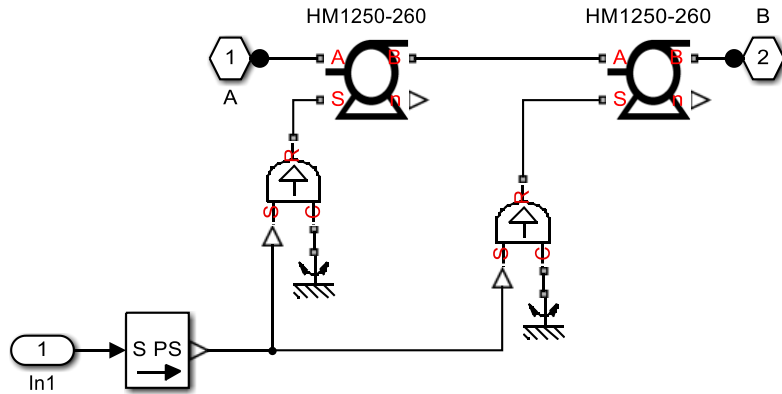


Рисунок 7.20. Графическое представление модель НПС в Simulink/SimHydraulics

Зависимости давления и расхода от времени и координаты сечения трубопровода представлены на рисунках 7.21 и 7.22.

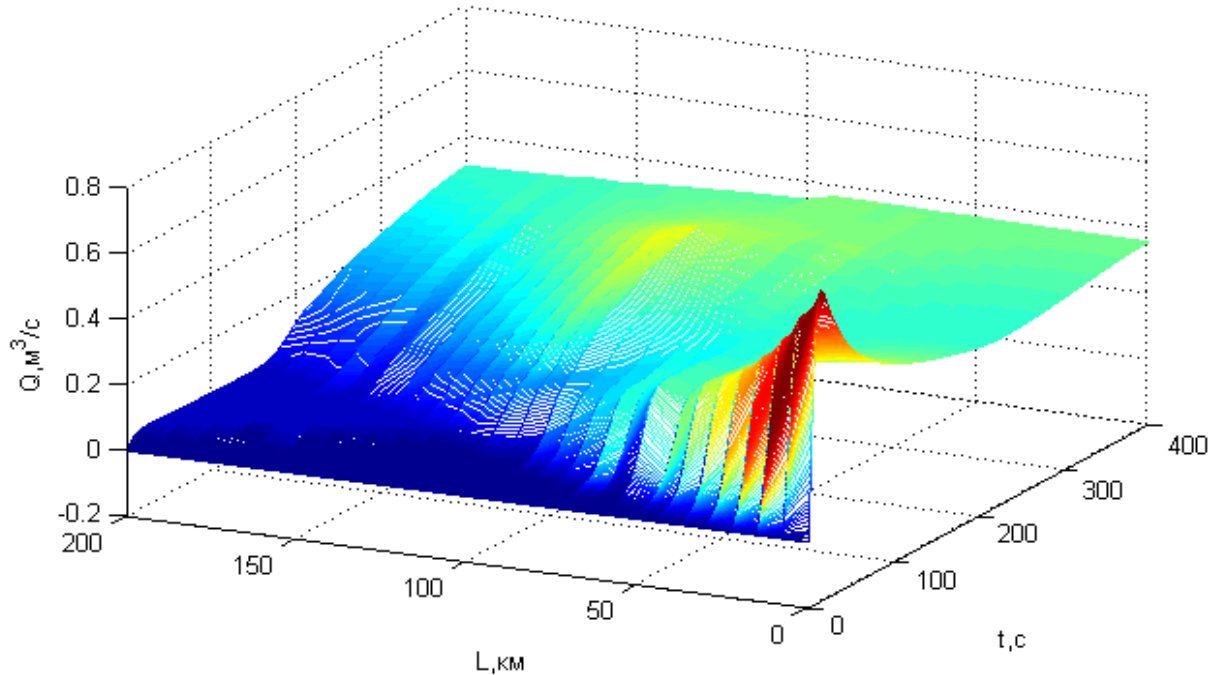


Рисунок 7.21. Зависимость расхода от времени и координаты сечения трубопровода

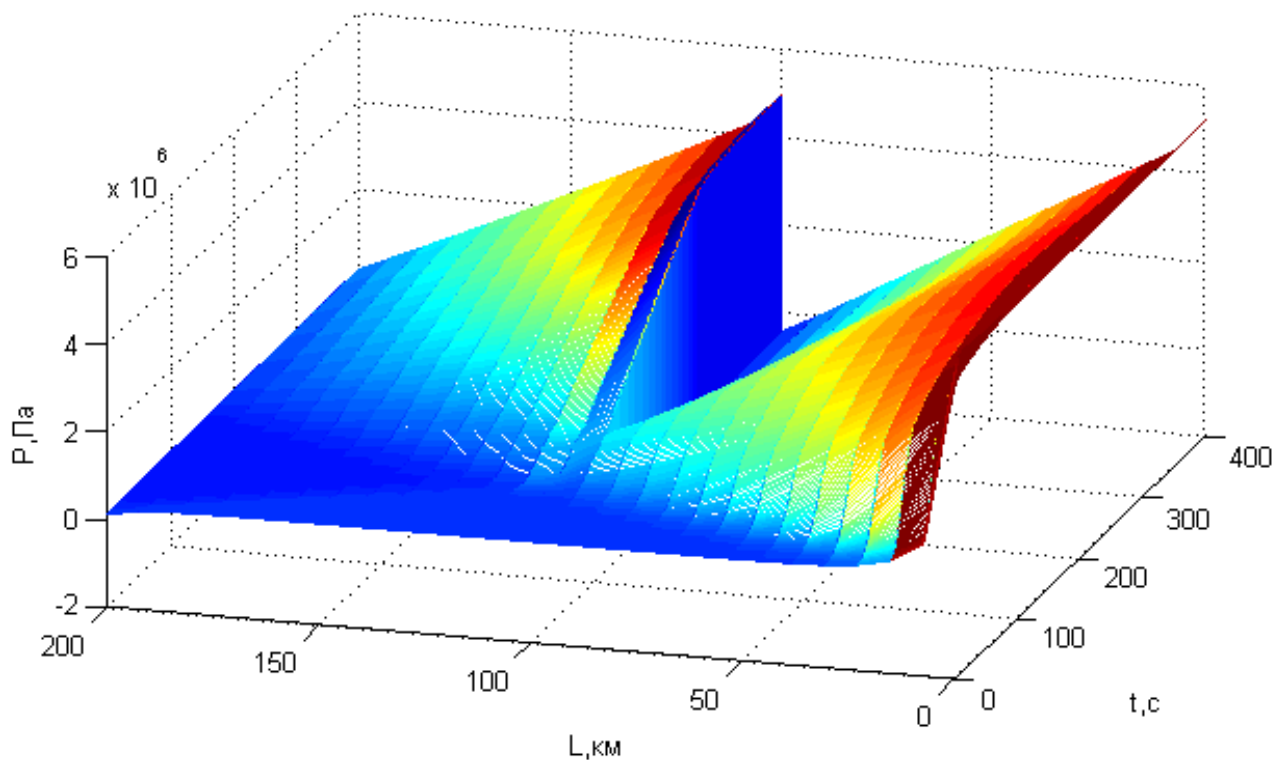


Рисунок 7.22. Зависимость давления от времени и координаты сечения трубопровода

В начальный момент времени жидкость в трубопроводе покоится и находится под давлением 3 атм. Затем включаются насосы ГНПС, давление и расход возрастают. Через промежуток времени, равный ста секундам, волна возмущения достигает второй НПС. В момент времени, равный 120 секундам после начала симуляции, включаются насосы НПС, и давление в сечении с координатой 100 км начинает расти вместе с подачей нефти. Примерно через 400 секунд режим течения жидкости становится стационарным. При этом максимальное давление наблюдается в начальном сечении трубопровода.

Таким образом, созданы модели насосных агрегатов и нефтеперекачивающих станций, интегрированные в модели технологических участков магистрального нефтепровода. Работоспособность моделей продемонстрирована в результате серии проведенных численных экспериментов.

7.6 О настройке модели с использованием измерений переменных технологического процесса

Настройка является неотъемлемой процедурой при работе с моделями неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе. Настройка предполагает оптимизацию параметров модели по выбранному критерию качества. При этом очень важно определить, какие параметры модели можно варьировать в процессе оптимизации.

Эксперименты с динамическими моделями нефтепровода в пакете Matlab/SimHydraulics показали, что наиболее значимое влияние на качество модели оказывает показатель сжимаемости в системе «жидкость-труба» (величина модуля Юнга, модуля упругости жидкости).

Для настройки модели была использована следующая эвристическая процедура. В расчетную формулу блока, имитирующего сжимаемость жидкости, были введены поправочные коэффициенты, существенно влияющие на скорость распространения волн давления и на степень их затухания:

$$a \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \quad (7.17)$$

$$\frac{dp(x,t)}{dx} = b \cdot \rho \frac{dv(x,t)}{dt}, \quad (7.18)$$

где a, b - введённые поправочные коэффициенты.

Качество модели оценивали по критерию относительной погрешности отклика модели в виде:

$$\xi_p = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left| \frac{p_{ij} - \hat{p}_{ij}}{p_{\max}} \right| \cdot 100\%, \quad (7.19)$$

где \hat{p}_{ij} – расчетное давление, соответствующее j -ому участку в i -ый момент времени; p_{ij} – измеренное давление, соответствующее j -ому участку в i -ый момент времени; p_{\max} – максимальная амплитуда измеренных давлений; M –

количество датчиков, установленных на линейных участках трубопровода; N – количество временных интервалов в течение периода, описываемого моделью.

В *Matlab/Simulink* существует встроенный инструмент для оптимизации неизвестных параметров модели по выборочным данным измерений переменных объекта – *Simulink Design Optimization* [274]. Для оптимизации неизвестных параметров модели была создана пользовательская функция, многократно запускающая процесс построения модели магистрального нефтепровода при заданных значениях оптимизируемых параметров. После расчета переходного режима функция рассчитывает погрешность в соответствии с критериальной функцией (6.19).

Для оптимизации целевой функции использовались поисковые методы, в том числе генетический алгоритм оптимизации (ГА) [158]. Оптимизация модели осуществлялась с помощью встроенных средств Matlab. Для вызова инструмента для оптимизации необходимо воспользоваться командой *optimtool*. После чего на экране появляется окно для выбора и настройки оптимизирующего алгоритма (рисунок 7.23).

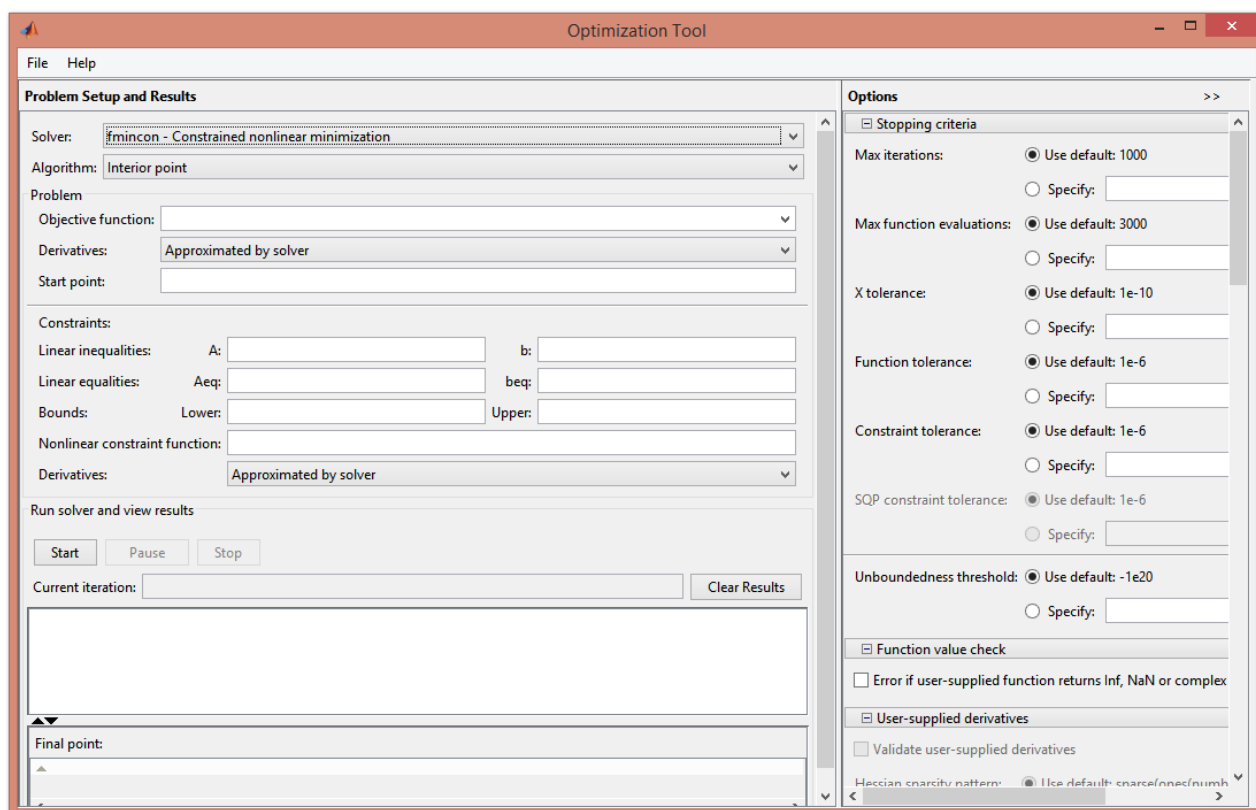


Рисунок 7.23. Окно инструмента оптимизации *Optimization Tool*

В окне инструмента *Optimization Tool* пользователем выбирается алгоритм оптимизации, целевая функция, начальные значения оптимизируемых переменных. Для ускорения поиска оптимальных параметров необходимо указать границы их изменения.

Результаты настройки модели приведем в следующем подразделе работы.

7.7. Модель технологического участка магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск»

Идентификационный подход к построению модели нефтепровода ранее рассматривался в различных работах, например [195]. Отличие настоящей модели от предшествующих ей аналогов заключается в том, что построение предлагаемой модели происходит для крупного технологического участка на макроуровне с использованием подвергнувшегося модификациям специализированного программного инструмента (Matlab/SimHydraulics). Таким образом, принципы идентификационного подхода здесь сочетаются с имитационной технологией построения моделей. В результате достигается возможность построения моделей сложных масштабируемых трубопроводных систем.

Моделирование неустановившихся технологических процессов производилось для участка магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск» [42], [43] (рисунок 7.24).

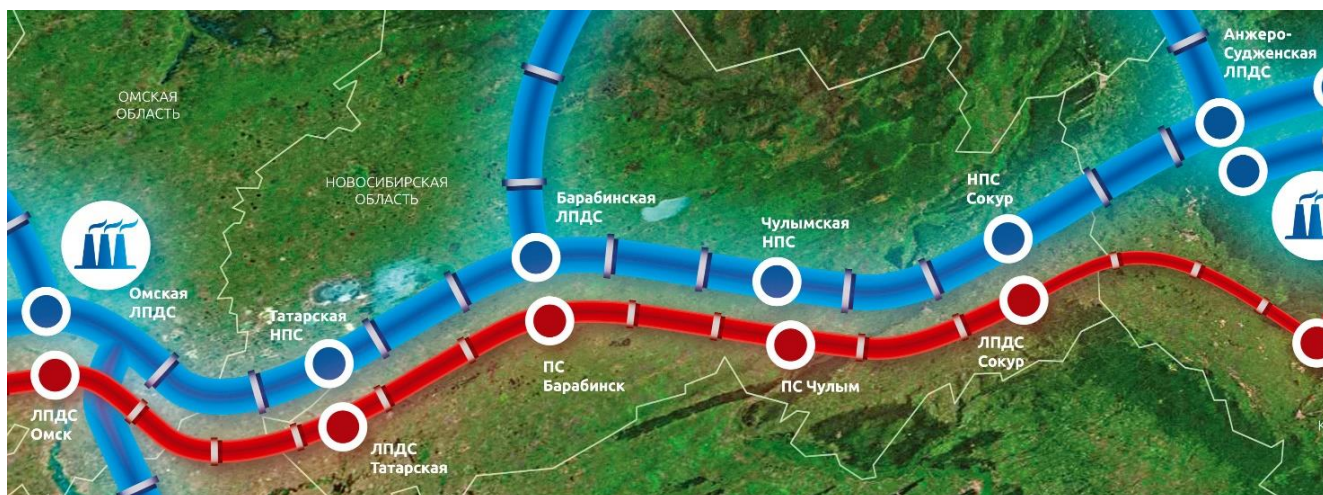


Рисунок 7.24. Схема магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск»

Рассматриваемый технологический участок длиной 908,7 км находится в Омской и Новосибирской областях. Нефтепровод имеет диаметр 720 мм. По маршруту участка расположены шесть НПС [43]: Омская, Татарская, Барабинская, Чулымская, Анжеро-Судженская НПС и НПС Сокур.

В качестве исходных данных для построения модели были использованы результаты испытаний переходных режимов на указанном магистральном нефтепроводе: высотные отметки, показания с датчиков давления; гидравлические $Q-N$ характеристики основных и подпорных магистральных насосов; количество насосов на каждой нефтеперекачивающей станции; диаметры рабочих колес насосов.

Модель магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск», построенная в *Matlab/SimHydraulics*, состоит из трех модулей:

- *модуль управления*. В данном модуле генерируются управляющие сигналы для подачи на модели насосных агрегатов;
- *тело модели* (рисунок 7.25), состоит из блоков *My_Segmented_Pipeline*, *My_Pump*, блоков для сбора данных о прогнозных значениях технологических переменных;
- *модуль записи* результатов моделирования в файл данных.

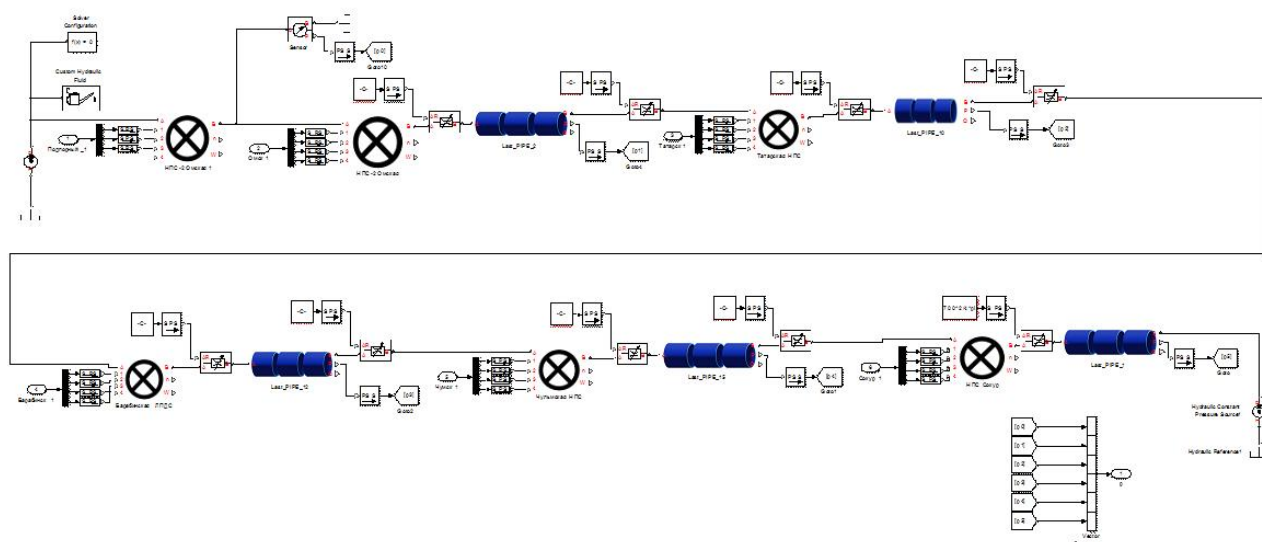


Рисунок 7.25. Модель магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск», построенная в *Matlab/SimHydraulics*

Исходными данными для настройки модели трубопровода «Омск – Анжеро-Судженск» являются: профиль трубопровода, высотные отметки, информация о перекачивающих станциях (количество насосов и порядок их включения), информация о режимах работы соответствующих измеренным данным, средняя плотность, вязкость перекачиваемой жидкости.

Значения параметров, которые не были точно известны (модуль Юнга для труб, скорость распространения волн давления в трубопроводе, объемный модуль упругости жидкости, абсолютная шероховатость, местные сопротивления) были приняты приблизительно, руководствуясь информацией в справочной литературе [198]. Данные о режимах работы технологического участка были получены из соответствующих актов опробования переходных режимов.

Характеристики насосных агрегатов были получены на основании паспортных данных с применением квадратичной аппроксимации. Аппроксимация производилась на наборе измеренных значений паспортных кривых с помощью метода наименьших квадратов [117].

На рисунке 7.26 изображены измеренная и аппроксимированная Q - H характеристики насоса НМ2500-230.

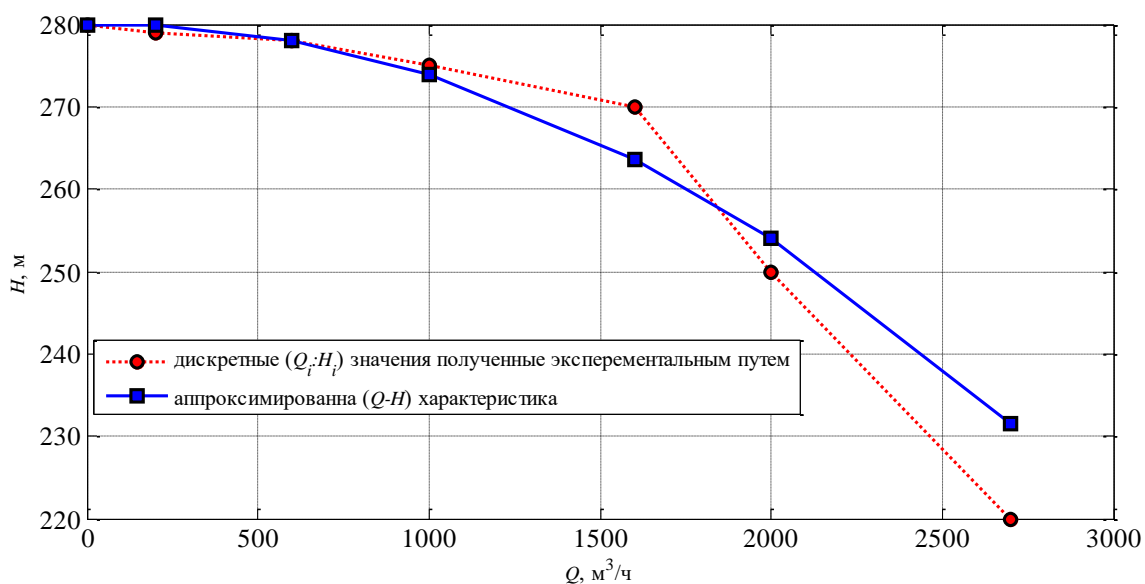


Рисунок 7.26. Q - H характеристика насоса NM2500-230

В качестве исходных данных для оптимизации модели использовали измеренные давления на линейной части нефтепровода «Омск-Анжеро-Судженск» за 30.03.2015 г. Данные соответствовали переходному режиму (запуск магистрального трубопровода с последовательным включением нефтеперекачивающих станций). Зависимости оптимального расчетного и измеренного давлений от координаты и времени для оптимальной модели представлены на рисунке 7.27.

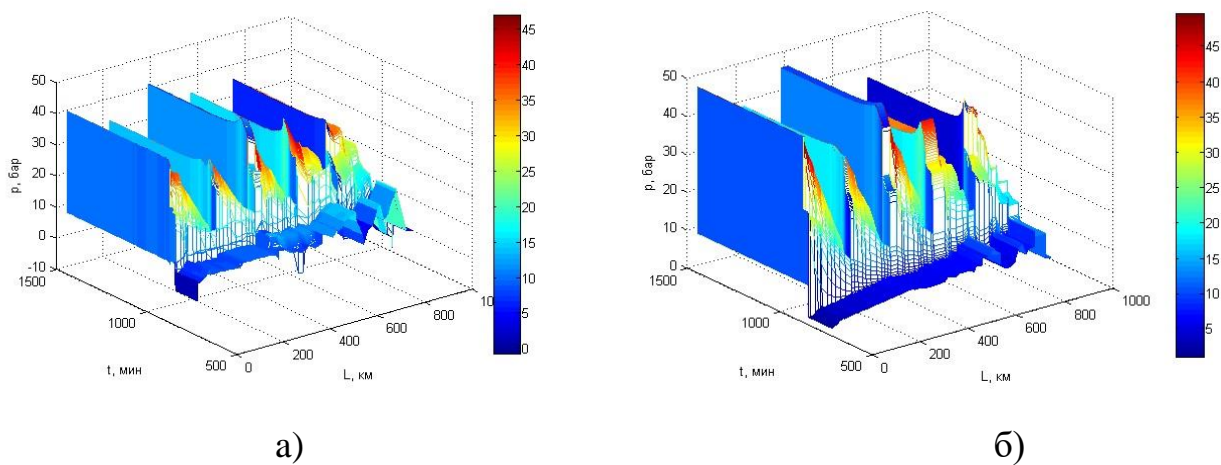


Рисунок 7.27. Зависимости измеренного и расчетного давлений: *а* – измеренная зависимость давления от координаты и времени; *б* – расчетная зависимость давления от координаты и времени

На графике (рисунок 7.27) видно, что значения давлений, полученных с помощью модели, и измеренные величины давления, демонстрируют качественную схожесть зависимостей от времени и координаты. Значение критерия качества составило $\varepsilon_p = 7,8\%$.

Для тестирования работы оптимальной модели проведем её верификацию на данных другого переходного режима. Выбранный режим для верификации модели соответствовал последовательной остановке насосных станций на дату 06.03.2015г. на том же технологическом участке магистрального нефтепровода. Результаты верификации модели показаны на рисунке 7.28.

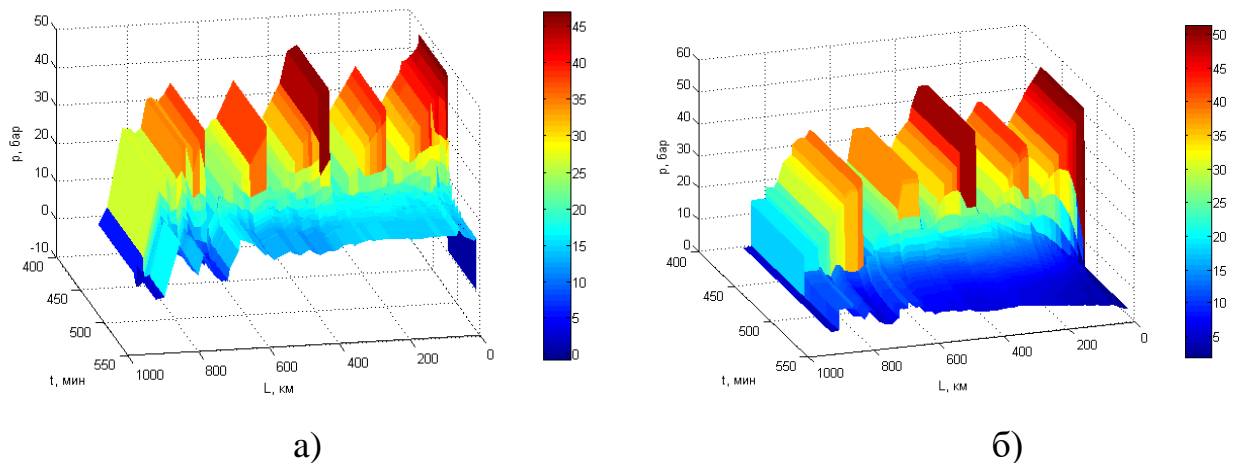


Рисунок 7.28. Зависимости измеренного и расчетного давлений: *а* – расчетная зависимость давления от координаты и времени; *б* – измеренная зависимость давления от координаты и времени

Значение критерия относительной погрешности при сравнении модели и измеренных величин давления составило $\varepsilon_p = 9\%$, что является хорошим показателем и позволяет судить о правильности выбранного подхода к построению моделей переходных процессов в магистральном нефтепроводе. Таким образом, сравнение результатов тестирования предлагаемых моделей и реальных данных, показал, что разработанные в *Matlab/SimHydraulics* модели, учитывающие переходные процессы в магистральных нефтепроводах, могут

применяться в практике для задач прогнозирования и мониторинга технологических процессов в магистральном нефтепроводе.

7.8. Прогноз энергозатрат при переходных режимах

Политика энергосбережения и энергоэффективности – одно из ключевых направлений развития промышленности и хозяйства в Российской Федерации, что подтверждается постановлениями Правительства РФ, Федеральными и Региональными программами развития экономики [221]. Нефтегазовый комплекс на сегодняшний день остается одним из наиболее приоритетных в структуре национальной экономики, а объекты нефтегазового комплекса, например, нефтеперекачивающие станции и другое оборудование магистрального нефтепровода, являются весомыми потребителями электроэнергии.

В соответствии с Энергетической политикой [220], утвержденной ПАО «Транснефть» в 2012 году, предусмотрены мероприятия по организации статистического наблюдения за энергоэффективностью, мониторинг и анализ основных характеристик использования и потребления топливно-энергетических ресурсов и факторов, влияющих на уровень их потребления, определение прогнозного уровня потребления топливно-энергетических ресурсов, установление подходов к планированию и нормированию топливно-энергетических ресурсов, к учету их расхода и контролю их использования, выявление причин перерасхода топливно-энергетических ресурсов и разработка адресных мер по их устранению.

Мероприятия, предусмотренные Энергетической политикой ПАО «Транснефть», не могут быть реализованы без привлечения математических моделей, позволяющих прогнозировать гидродинамические процессы в нефтепроводе, и, на их основе, рассчитывать потребление электроэнергии технологическим оборудованием. Для прогноза энергозатрат в компании ПАО «Транснефть» применяются статические модели течения жидкости [49], [146].

Однако примерно два раза в сутки происходит переходный режим в результате включения/выключения насосов, открытия/закрытия задвижек, регулирующей аппаратуры. Длительность данных режимов составляет около часа. В связи с этим возникает необходимость учитывать энергозатраты при переходных режимах.

Мониторингу и прогнозу энергозатрат посвящены многие работы, в качестве примера можно привести [68], связь энергосбережения и системы управления отражена в работе [281]. Роль и функции технологов в энергетическом менеджменте рассмотрены в [162]. Экономия затрачиваемой энергии в переходных режимах работы рассматривается в [276]. Прогноз энергозатрат с применением искусственных нейронных сетей описан в [285]. В настоящей работе прогноз затрат электроэнергии при эксплуатации нефтепровода осуществляется расчетным путем с использованием предложенной имитационной модели технологических параметров в пакете Matlab/SimHydraulics.

Контроль энергетических параметров в модели нефтепровода осуществляется путем использования модифицированного блока *Mu_Pump*. Для иллюстрации результатов построим модель магистрального трубопровода. Приняты следующие параметры трубопровода: $L = 880$ км, $D = 804$ мм, $\Delta = 0,2$ мм, модуль Юнга для материала трубопровода $E = 1,9 \cdot 10^{11}$. Через каждые 80 км на трубопроводе расположены НПС, состоящие из трех последовательно соединенных насосов НМ3600-230 [201]. По трубопроводу перекачивается нефтепродукт со следующими реологическими характеристиками: плотность $\rho = 886 \text{ кг/м}^3$, вязкость $\nu = 0,997 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, модуль сжимаемости жидкости $K = 1,4 \cdot 10^9$ Па. Осуществим переход из одного технологического режима в другой, имитируя отключение одного из трех насосов НПС. Представим зависимости потребляемой энергии магистрального трубопровода от времени, используя динамическую и статическую модели течения жидкости (рисунок 7.29).

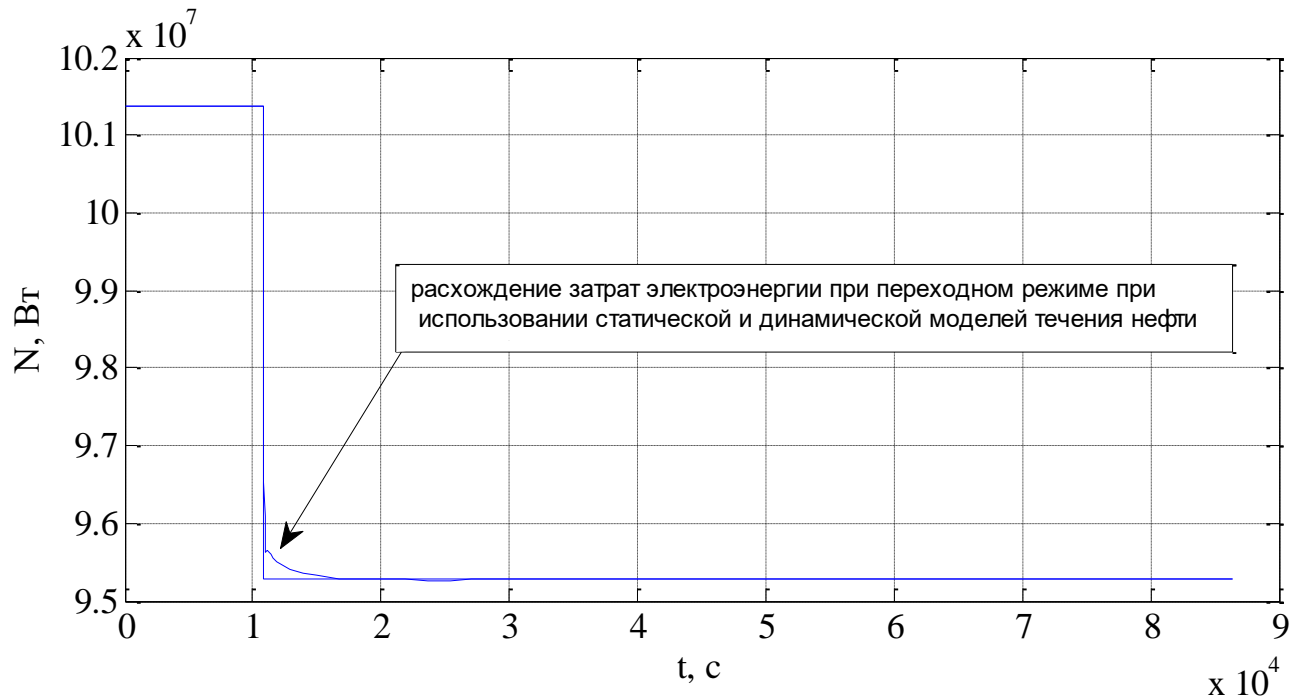


Рисунок 7.29. Зависимости потребляемой суммарной энергии магистрального трубопровода от времени, полученные с помощью динамической и статической модели течения жидкости

В статической модели течения жидкости при отключении насоса не учитывается переходный режим, и значение суммарной мощности мгновенно уменьшается. Если использовать динамическую модель течения жидкости, при отключении насоса значение суммарной мощности уменьшается с течением времени. Проинтегрируем функцию мощности по времени в соответствии с формулой:

$$E(T) = \int_0^T \frac{p(t) \cdot q(t)}{\eta(t)} dt, \quad (7.20)$$

где $E(T)$ – расход электроэнергии за период времени T . Интегрирование производится численно с применением метода трапеций.

На основании численных экспериментов было оценено расчетное количество затраченной энергии на магистральном трубопроводе за сутки. Отклонение рассчитанного расхода электроэнергии с использованием статической и динамической моделей течения жидкости за одни сутки при наличии двух переходных режимов составило $0,1798$ МВт·ч.

На примере нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск» расчетное энергопотребление при запуске нефтепровода с применением динамической модели составило 61,2 МВт·ч, при использовании статической модели - 57,4 МВт·ч. Разница рассчитанных расходов электроэнергии с использованием статической и динамической моделей течения жидкости составит 3,8 МВт·ч.

Таким образом, с использованием предложенной модели неустановившихся режимов работы магистрального нефтепровода, предприятие АО «Транснефть – Западная Сибирь» сможет более точно прогнозировать расход электроэнергии.

Выводы по главе 7

В седьмой главе диссертации рассмотрены особенности применения пакета Matlab/SimHydraulics для построения модели неустановившегося движения жидкости в магистральном нефтепроводе. Стандартные блоки, включенные в пакет Matlab/SimHydraulics, позволяют производить процесс моделирования неустановившихся режимов течения нефти, однако они не предоставляют возможность контроля и визуализации ключевых технологических параметров в зависимости от координаты сечения линейной части трубопровода. С их использованием отсутствует возможность настройки в модели скорости распространения волн возмущения в трубопроводе.

В итоге проведенной работы были разработаны модификации некоторых блоков SimHydraulics, которые позволили устранить перечисленные недостатки и адаптировать пакет к решению задач моделирования процессов в нефтепроводе. Дополнительно была создана библиотека программных средств, позволяющая учитывать теплообменные процессы в магистральных трубопроводах. Повышена точность расчета моделей за счет учета температурного воздействия на реологические свойства нефти.

Произведена модификация стандартных инструментов Matlab/SimHydraulics, позволяющая уточнить прогноз энергопотребления

технологического оборудования с привлечением динамических моделей трубопровода. С использованием предложенных модификаций создана модель, позволяющая рассчитывать расход электроэнергии насосными перекачивающими станциями в переходных режимах в течение заданного периода времени.

Наибольшее внимание в работе было уделено настройке и верификации полученных моделей. Предложен критерий качества и процедура оптимизации моделей. Для данных измерений давлений при осуществлении переходных режиме на участке «Омск – Анжеро-Судженск» построена модель и дана оценка качества построенной модели. Относительное отклонение измеренных и спрогнозированных с применением модели данных составляет 7,8-9%.

Таким образом, применение предложенного алгоритмического и программно-технического комплекса в ПАО «Транснефть» и его структурных подразделениях позволит улучшить эффективность обслуживания технологического оборудования, оптимизировать технологические режимы, повысив надежность и безопасность эксплуатации оборудования. При этом появляется инструмент для более точного прогноза энергозатрат на технологические нужды, использование которого на практике позволит избежать штрафов за перерасход или недобор электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе разработаны и исследованы алгоритмические и программно-технические средства, позволяющие совершенствовать мониторинг и прогноз технологических параметров в процессе эксплуатации магистрального нефтепровода, что приводит к увеличению безопасности и расширению автоматизации технологических процессов. Работа вносит вклад в развитие цифровизации и интеллектуализации в сфере трубопроводного транспорта. По совокупности полученных в работе результатов можно сделать вывод о решении важной проблемы, имеющей как научное, так и практическое значение.

В качестве **итогов выполненного исследования** можно считать достижение следующих основных результатов:

1. Представлена характеристика и отличительные особенности магистрального нефтепровода как объекта мониторинга и прогноза, осуществлен анализ подходов и методов построения моделей технологических процессов перекачки нефти в магистральном нефтепроводе, выявлена необходимость совершенствования средств моделирования с привлечением интеллектуальных и адаптивных методов в условиях неопределенности с целью повышения эффективности контроля и управления перекачкой нефти.

2. Разработаны новые адаптивные непараметрические методы и алгоритмы прогноза состояния статических и динамических систем, позволяющие строить модели перечисленных систем в условиях неопределенности. Рассмотрен случай идентификации динамических систем с запаздыванием. Доказана асимптотическая сходимость моделей, представлены результаты численного моделирования разработанных алгоритмов.

3. Предложен и проанализирован новый метод исследования линейности динамических систем с введением адаптивного критерия линейности – относительной меры нелинейности, а также алгоритма кусочной линеаризации моделей динамических систем с учетом начальных условий. Настройка

начальных условий осуществляется регулятором с использованием процедуры оценивания обратного оператора динамической системы. С использованием предложенного метода выработан алгоритм решения задачи построения модели работы электрических нагревательных элементов в нефтепроводе в условиях недостатка априорных сведений о характеристиках процесса нагрева.

4. Предложен новый метод и реализующее его алгоритмическое обеспечение идентификации многосвязных статических систем на основе оценки решения систем нелинейных уравнений. На примере показана применимость предложенного метода идентификации нефтепроводной сети с оценкой уравнений Кирхгофа для гидравлической сети в условиях недостатка априорных сведений. В результате на порядок увеличена скорость расчета расходов для участков сети и надежность нахождения решения по сравнению с алгоритмами ньютоновского типа.

5. На основе принципов построения гибридных адаптивных моделей разработан новый алгоритм коррекции погрешностей измерения давления на линейной части магистрального нефтепровода, обладающий возможностью учета как априорных сведений о характере распределения давления, так и вновь поступающих измерений, и может использоваться для автоматизации контроля, диагностики неисправностей и коррекции погрешностей датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода.

6. Предложена новая имитационная модель магистрального нефтепровода, представляющая собой альтернативу моделям, основанным на численном решении уравнений Навье-Стокса. Разработанная модель адаптирована для решения задачи ускоренного прогноза неустановившихся режимов работы магистрального нефтепровода для функционирования в составе средств диспетчерского контроля и управления. Работоспособность модели проиллюстрирована серией численных экспериментов.

7. Проанализированы возможности программного продукта MATLAB/SimHydraulics в качестве инструмента контроля за протеканием неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе. Создана новая

библиотека инструментов MATLAB/SimHydraulics, в которой устранены недостатки, препятствующие решению задачи моделирования процессов в магистральном нефтепроводе. С помощью созданных инструментов решена задача прогноза распределенных технологических параметров (давление, расход, энергопотребление) в режиме реального времени при переходе между технологическими режимами участка нефтепровода АО «Транснефть – Западная Сибирь».

В результате выполнения работы можно сделать следующие **рекомендации:**

1. В процессе построения систем мониторинга и прогноза технологических процессов в нефтепроводе, учитывая степень их сложности и неопределенности, рекомендуется широко использовать алгоритмы моделирования, комбинирующие фундаментальные принципы гидравлики, гидродинамики, теории упругости, термодинамики и т. д. с процедурами, основанными на анализе измеренных данных с применением имитационных, адаптивных и интеллектуальных методов. Синтез двух подходов позволит достичь эффекта, выраженного в повышенной скорости, точности и устойчивости прогнозных моделей и, как следствие, принимаемых решений в ходе автоматизированного управления оборудованием нефтепровода.

2. Модели неустановившихся процессов в нефтепроводе, в том числе предложенные в работе, рекомендуется использовать для решения комплекса задач мониторинга и прогноза технологических параметров, включая прогноз и планирование расхода электроэнергии, что позволит повысить уровень безопасности и энергоэффективности.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования предусматривают, в том числе, основываясь на предложенных подходах, создание средств поддержки принятия решений для технологов и диспетчеров с учетом анализа ретроспективной информации в форме т.н. «больших данных», позволяющих снизить влияние «человеческого фактора» при управлении процессами перекачки нефти по магистральному нефтепроводу.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АК	акционерная компания,
АИИС КУЭ	автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии,
АСТУЭ	автоматизированная система технического учета электроэнергии,
АО	акционерное общество,
АСУ ТП	автоматизированная система управления технологическими процессами,
БД	база данных,
ГА	генетический алгоритм,
ГНПС	головная нефтеперекачивающая станция,
ДДК	дополнительный дефектоскопический контроль,
ЕСДУ	единая система диспетчерского управления,
ИМС	информационно-моделирующая система,
ИУС	информационно-управляющая система,
ИПФ	импульсная переходная функция,
КИИ	критическая информационная инфраструктура,
КПД	коэффициент полезного действия,
ИС	информационная система,
ИТ	информационные технологии,
ЛДС	линейная динамическая система,
ЛЧ МН	линейная часть магистрального нефтепровода,
МН	магистральный нефтепровод,
МНК	метод наименьших квадратов,
МПП	метод последовательных приближений,
НМ	насос магистральный,
НПЗ	нефтеперерабатывающий завод,
НПС	нефтеперекачивающая станция,

НЭ	нелинейный элемент,
П, ПИ, ПИД	пропорциональный, пропорционально-интегральный, пропорционально-интегрально-дифференциальный законы регулирования,
ПАО	публичное акционерное общество,
ПО	программное обеспечение,
ПТУС	производственно-техническое управление связи,
РД	руководящая документация,
РП	резервуарный парк,
САПР	система автоматизированного проектирования,
СДКУ	система диспетчерского контроля и управления,
СИКН	система измерения количества и показателей качества нефти,
СКО	среднеквадратическое отклонение,
СОУ	система обнаружения утечек,
СПГ	сжиженный природный газ,
ССВД	система сглаживания волн давления,
ЦДП	центральный диспетчерский пункт,
MSE	Mean Squared Error – среднеквадратическая ошибка,
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control - связывание и встраивание объектов в системах управления процессами,
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов, Е.Д. Адаптивные комбинированные модели в задаче идентификации процессов в магистральном нефтепроводе [Текст] / Е.Д. Агафонов // Труды Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 2014. – С. 3029-3037.
2. Агафонов, Е.Д. Алгоритм коррекции ошибок измерений датчиков давления на линейной части магистрального нефтепровода [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 7. – С. 43-48.
3. Агафонов, Е.Д. Алгоритмы непараметрического управления линейными динамическими системами и их модификации [Текст] / Е.Д. Агафонов // Вестник НИИ СУВПТ. – 2000. – Вып. 4. – С. 3-28.
4. Агафонов, Е.Д. Идентификация и управление технологическими параметрами гидравлических сетей / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Материалы XVIII Межд. науч. конф. «Решетневские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2014, Т.2. – С. 7-8.
5. Агафонов, Е.Д. Идентификация неустановившихся режимов магистрального нефтепровода с использованием MATLAB/SIMSCAPE [Текст] / Е.Д. Агафонов, А.Г. Миронов // Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы. ФИТМ-2014: материалы межд. науч.-практ. конф., Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 4-10.
6. Агафонов, Е.Д. Идентификация параметров гидравлического сопротивления модели гидравлической сети [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. – С. 492-498.
7. Агафонов, Е.Д. Имитационная эвристическая модель магистрального нефтепровода [Текст] / Е.Д. Агафонов, Г.В. Ващенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 195-203.

8. Агафонов, Е.Д. Использование среды Matlab/Simulink для анализа непараметрических моделей динамических систем [Текст] / Е.Д. Агафонов, В.П. Граблевский // Практика применения научного программного обеспечения: Труды V Межвузовской конференции по научному программному обеспечению, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 54-63.

9. Агафонов, Е.Д. К вопросу синтеза адаптивных алгоритмов идентификации технологического процесса перекачки нефти по магистральным нефтепроводам [Текст] / Е.Д. Агафонов // XIV науч.-техн. конф. молодежи ОАО «Транссибнефть»: тезисы конкурсных работ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – С. 67.

10. Агафонов, Е.Д. К вопросу синтеза адаптивных алгоритмов идентификации технологического процесса перекачки нефти по магистральным нефтепроводам [Текст] / Е.Д. Агафонов // Материалы XVII Межд. науч. конф. «Решетневские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2013, Т.2. – С. 5-7.

11. Агафонов, Е.Д. Моделирование линейных динамических систем с использованием методов непараметрического оценивания [Текст] / Е.Д. Агафонов // Сборник «Актуальные проблемы авиастроения: VII Всероссийские Туполевские чтения». Тезисы докладов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1996. – С. 84.

12. Агафонов, Е.Д. Непараметрическая модель инфракрасной лампы в системах быстрого нагрева для изготовления полупроводниковых материалов [Текст] / Е.Д. Агафонов // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». – Курск: КурскГТУ, 2009. – С. 25-29.

13. Агафонов, Е.Д. Непараметрическая оценка условной плотности распределения вероятности в задаче управления статическим объектом [Текст] / Е.Д. Агафонов, Ю.В. Смешко // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2011. – Вып. 3 (36). – С. 11-15.

14. Агафонов, Е.Д. Непараметрические модели в интеллектуальных

системах идентификации [Текст] / Е.Д. Агафонов, О.А. Иконников, О.В. Кузнецова, А.Н. Пупков, Н.А. Сергеева // Интеллектуальные системы и информационные технологии управления: Труды Международной науч. конф. (Псков). – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – С. 47-50.

15. Агафонов, Е.Д. Непараметрический алгоритм управления нелинейными динамическими системами с использованием скользящих режимов [Текст] / Е.Д. Агафонов // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева: Материалы XII Международного симпозиума по непараметрическим методам в кибернетике и системному анализу. – 2010. – Вып. 5(31). – С. 26-30.

16. Агафонов, Е.Д. Непараметрический критерий линейности в задачах идентификации динамических процессов [Текст] / Е.Д. Агафонов // Труды VI Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'07, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2007.

17. Агафонов, Е.Д. Непараметрическое моделирование линейных динамических объектов с векторным входом [Текст] / Е.Д. Агафонов // Решетневские чтения: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. – Вып.2. – Красноярск: САА, 1998. – С. 154-155.

18. Агафонов, Е.Д. Непараметрическая модель в задаче прогнозирования мощности ветряных электрических установок [Текст] / Е.Д. Агафонов, Е.С. Мангалова, О.В. Шестернёва // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва. – 2013. – № 2(48). – С. 4-9.

19. Агафонов, Е.Д. Об исследовании непараметрических оценок производной кривой регрессии [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.А. Медведева // Информатика и системы управления: межвузовский аспирантский и докторантский сборник науч. трудов. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 1996. – С. 176-182.

20. Агафонов, Е.Д. Об одной модификации непараметрического алгоритма управления линейными динамическими системами [Текст] / Е.Д.

Агафонов // Вестник Сибирской аэрокосмической академии им. академика М.Ф. Решетнева. – 2001. – Вып. 2. – С. 145-152.

21. Агафонов, Е.Д. Об одном алгоритме классификации с использованием коллективов непараметрических моделей [Текст] / Е.Д. Агафонов, Е.С. Мангалова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. 42 (2). – С. 4-7.

22. Агафонов, Е.Д. Об одном подходе к идентификации нелинейных динамических систем [Текст] / Е.Д. Агафонов, В.В. Синельников // Решетневские чтения: Тезисы докладов IV Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. – Красноярск: САА, 2000. – С. 182-184.

23. Агафонов, Е.Д. Об особенностях использования системы Matlab/SimHydraulics в задаче построения моделей магистральных нефтепроводов [Текст] / Е.Д. Агафонов, Ю.Н. Безбородов, А.Г. Миронов // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 3 (103). – С. 76-82.

24. Агафонов, Е.Д. Об оценке решения системы уравнений в задаче построения модели гидравлической сети [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 3. – С. 110-117.

25. Агафонов, Е.Д. Об учете начальных условий в задаче непараметрической идентификации нелинейных динамических процессов с использованием метода линеаризации [Текст] / Е.Д. Агафонов, Е.С. Кирик // Труды III Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'04, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. – С. 845-855.

26. Агафонов, Е.Д. Об учете скорости распространения волн давления при моделировании неустановившихся процессов с помощью Matlab/SimHydraulics [Текст] / Е.Д. Агафонов, А.Г. Миронов, Ю.Н. Безбородов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 8 (103). – С. 12–19.

27. Агафонов, Е.Д. О задаче идентификации систем быстрого нагрева с использованием непараметрических методов [Текст] / Е.Д. Агафонов // Решетневские чтения: Тезисы докладов III Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. – Красноярск: САА, 1999. – С. 161-163.

28. Агафонов, Е.Д. О задаче непараметрической идентификации и управления для линейных динамических систем [Текст] / Е.Д. Агафонов // Перспективные направления развития оборонного комплекса: Тезисы докладов ежегодной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых специалистов и соискателей. – Вып. 2. – Красноярск: САА, 2000. – С. 16-17.

29. Агафонов, Е.Д. О проверке гипотезы линейности динамических систем [Текст] / Е.Д. Агафонов // Вестник НИИ СУВПТ. – 2000. – Вып. 5. – С. 18-25.

30. Агафонов, Е.Д. Применение непараметрических алгоритмов идентификации в построении динамической модели инфракрасной лампы для системы быстрого нагрева [Текст] / Е.Д. Агафонов // Интеллектуальные системы (INTELS'2010): Труды IX Международного симпозиума. – М.: РУСАКИ, 2010. – С. 157-161.

31. Агафонов, Е.Д. Прогнозная модель процесса каталитической гидродепарафинизации в условиях недостатка априорных сведений [Текст] / Е.Д. Агафонов, А.В. Медведев, Н.Ф. Орловская, В.Р. Синюта, Д.И. Ярещенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 9. – С. 456-468.

32. Агафонов, Е.Д. Программная реализация непараметрических алгоритмов идентификации и управления для динамических систем [Текст] / Е.Д. Агафонов // Проблемы информатизации региона ПИР-2000: Тезисы докладов VI Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск: КГТУ, 2000. – С. 49.

33. Агафонов, Е.Д. Программный модуль последовательного обучения коллектива непараметрических оценок регрессии / Е.Д. Агафонов, Е.С.

Мангалова, О.В. Шестернева // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611325 от 01.02.2017.

34. Агафонов, Е.Д. Программный модуль адаптивного прогноза показаний датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611650 от 07.02.2017.

35. Агафонов, Е.Д. Программный модуль вероятностного прогнозирования на основе параметрических, непараметрических и гибридных алгоритмов / Е.Д. Агафонов, Е.С. Мангалова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017619632 от 30.08.2017.

36. Агафонов, Е.Д. Разработка и исследование непараметрических алгоритмов идентификации и управления для динамических процессов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Агафонов Евгений Дмитриевич. – Красноярск, 2001. – 143 с.

37. Агафонов, Е.Д. Синтез непараметрических систем управления динамическими объектами [Текст] / Е.Д. Агафонов, О.А. Иконников, В.В. Милуш, А.Н. Пупков, Н.А. Сергеева // Проблемы синтеза и проектирования систем автоматического управления: Материалы науч.-практ. семинара «СИНТЕЗ'2001». – Новосибирск: НГТУ, 2001. – С. 105-108.

38. Агафонов, Е.Д. Современные тенденции информатизации и автоматизации нефтегазовой отрасли [Текст] / Е.Д. Агафонов, Г.В. Ващенко // Научный журнал Сибирского федерального университета: техника и технология. 2016. №9 (8). С. 1340-1348.

39. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления [Текст] / А.Д. Альтшуль. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

40. Андронов, А.А. Теория колебаний [Текст] / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Наука, 1981. – 568 с.

41. Антропов, Н.Р. Адаптивные модели коррекции показаний датчиков давления магистрального нефтепровода [Текст] / Н.Р. Антропов., Е.Д.

Агафонов // Материалы XIX Международной научной конференции «Решетневские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2015, Т.2. – С. 8-10.

42. АО «Транснефть – Западная Сибирь»: деятельность [Электронный ресурс]. – 2016. – Омск. – Режим доступа: <https://transsibneft.transneft.ru/about/deyatelnost/>

43. АО «Транснефть – Западная Сибирь» : практ. руководство [Текст] / Д.С. Снегирёв [и др.] // АО «Транснефть – Западная Сибирь». – 6-е изд., доп. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. – 100 с.

44. Ахметов, Р.М. Диспетчеризация и учет на нефтепроводах [Текст] / Р.М. Ахметов, Ю.В. Ливанов, А.В. Матвиенко. – М.: Недра, 1976. – 351 с.

45. Басниев, К.С. Нефтегазовая гидромеханика: учеб. для вузов [Текст] / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг. – Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 480 с.

46. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. - 768 с.

47. Беселия, Д.С. Определение цикличности магистрального нефтепровода [Электронный ресурс] / Д. С. Беселия // Молодая нефть: сб. статей. Всерос. молодежной науч.-техн. конф. нефтегазовой отрасли. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/oil2014/>

48. Биркгоф, Г. Гидродинамика [Текст] / Г. Биркгоф. – М.: Иностранная литература, 1963. – 244 с.

49. Богданов, Р.М. Расчет норм потребления электроэнергии в трубопроводном транспорте нефти [Электронный ресурс] // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2012. - №1. Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>

50. Бромберг, Э.М. Тестовые методы повышения точности измерений [Текст] / Э.М. Бромберг. - М.: Энергия, 1978. – 176 с.

51. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965.- 608 с.

52. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами [Текст] / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975, 568 с.

53. Вазан, М. Стохастическая аппроксимация [Текст] / М. Вазан. – М.: Мир, 1972. – 295 с.

54. Воронов, А.А. Основы теории автоматического регулирования и управления: учеб. пособие для вузов [Текст] / А.А. Воронов, В.К. Титов, Б.Н. Новогранов. - М.: Высшая школа, 1977. - 519 с.

55. Воронов, Е.Ю. Применение информационно-моделирующей системы «КОНТРОЛЬ» для мониторинга и прогнозирования отложений ядерно-опасных делящихся материалов в оборудовании [Текст] / Е.Ю. Воронов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2009. - №1. - Режим доступа: http://www.secnrs.ru/files/magazine/2009/51/51_11.pdf

56. Вязунов, Е.В. Аналитическое представление характеристик центробежных насосов при переменной частоте вращения [Текст] / Е.В. Вязунов, С.В. Путин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2012. - №4(8). - С. 67-69.

57. Вязунов, Е.В. Методика расчета перегрузок трубопровода по давлению в переходных процессах [Текст] // Нефтяное хозяйство. 1973, №9. – С. 45-47.

58. Вязунов, Е.В. Расчет перегрузок трубопровода по давлению в переходном процессе [Текст] / Е.В. Вязунов, Г.М. Фридман // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1976. – №9. – С. 17-18.

59. Газовые супертанкеры сломают хребет "Газпрому"? // Информационное агентство «Национальная служба новостей» [Электронный ресурс]. – 19.02.2015. – Режим доступа: <http://nsn.fm/economy/gazovye-supertankery-slomayut-khrebet-gazpromu-.php>

60. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы [Текст] / Р. Галлагер: пер. с англ. - М.: Мир, 1984. – 428 с.
61. Гельман, М.М. Автоматическая коррекция систематических погрешностей в преобразователях «напряжение – код» [Текст] / М.М. Гельман. - М.: Энергия, 1974. – 88 с.
62. Гидросистема: выбор диаметров и теплогидравлический расчет трубопроводных систем [Электронный ресурс] // ООО «НТП Трубопровод», АО «ИПН» – 2015. - М. – Режим доступа: <http://www.truboprovod.ru/cad/soft/hst.shtml>
63. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1999. – 479 с.
64. ГОСТ Р 51858-2002 Нефть. Общие технические условия. – Дата введ. 01.07.2002. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
65. ГОСТ ISO 17769-1-2014 Насосы жидкостные и установки. Основные термины, определения, количественные величины, буквенные обозначения и единицы измерения. Часть 1. Жидкостные насосы. – Дата введ. 01.09.2015. – М.: Стандартиформ, 2015. – 70 с.
66. Гришин, В.Н. Модели, алгоритмы и устройства идентификации сложных систем [Текст] / В.Н. Гришин, В.А. Дятлов, Л.Т. Милов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 104 с.
67. Гроп, Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гроп. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
68. Губеев, Т. Автоматизированная система мониторинга энергоэффективности нефтеперекачивающих станций [Текст] / Т. Губеев, Р. Масагутов // Башкирский химический журнал, 0869-8406, Т.16 №2. 2009. С. 97-99.
69. Дезоер, Ч. Теория линейных систем: Метод пространства состояний [Текст] / Ч. Дезоер, Л. Заде. – М.: Наука, 1970. – 704 с.
70. Деятельность // АО «Связьтранснефть» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://svyaz.transneft.ru/about/deyatelnost/>

71. Дисперсионная идентификация [Текст]; под ред. Н.С. Райбмана. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. - 336 с.
72. Дмитриев, Ю.Г. Об оценивании функционалов от плотности вероятности и ее производных [Текст] / Ю.Г. Дмитриев, Ф.П. Тарасенко // Теория вероятностей и ее применение. - 1973. - Вып. 18, №3. - С. 662-668.
73. Добровидов, А.В. Непараметрическое оценивание сигналов [Текст] / А.В. Добровидов, Г.М. Кошкин. - М.: Наука. Физматлит, 1997. - 336 с.
74. Единая система газоснабжения России // ПАО «Газпром» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://www.gazprom.ru/about/production/transportation/>
75. Епанечников, В.А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности [Текст] / В.А. Епанечников // Теория вероятностей и ее применение. – 1969. - Том 14, Вып. 1. – С. 156–161.
76. Живоглядов В.П. Непараметрические алгоритмы адаптации / В.П. Живоглядов, А.В. Медведев. - Фрунзе: Илим, 1974. - 136 с.
77. Жумагулов, Б.Т. Комплексные системы мониторинга нефтепроводов на базе лазерных и пленочных технологий / Б.Т. Жумагулов [и др.] // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2013, №3. - С. 51-54.
78. Зайцев, Л.А. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов [Текст] / Л.А. Зайцев, Г.С. Ясинский. – М.: Недра, 1980. – 187 с.
79. Земельман, М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств [Текст] / М.А. Земельман. - М.: Изд-во стандартов, 1972. – 199 с.
80. Иванилов, А.А. Алгоритмы идентификации и управления для линейных динамических систем в условиях непараметрической неопределенности: дис. ...канд. техн. наук: 05.13.01 / Иванилов Андрей Александрович. – Красноярск, 1986. - 187 с.
81. Иванилов, А.А. Непараметрическая оценка производной функции регрессии и ее применение к задаче идентификации [Текст] / А.А. Иванилов, С.А. Ковязин // В кн.: Адаптивные системы и их приложения. - Новосибирск:

Наука, 1978. - С. 109-119.

82. Иванилов, А.А. Непараметрические алгоритмы идентификации динамических систем [Текст] / А.А. Иванилов, С.Н. Чайка // Препринт ВЦ СО АН СССР. - Красноярск: ВЦ СО АН СССР, 1979.

83. Иванилов, А.А. Об алгоритмах идентификации линейных систем с запаздыванием [Текст] / А.А. Иванилов // В кн.: Стохастические системы управления. - Новосибирск: Наука, 1979, С. 50-53.

84. Иконников, О.А. Разработка и исследование непараметрических алгоритмов идентификации линейных динамических систем высоких порядков: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Иконников Олег Александрович. – Красноярск, 2003. – 146 с.

85. Исследование адаптивных моделей и алгоритмов управления многомерными стохастическими системами с запаздыванием : отчет по результатам НИОКР / Е.Д. Агафонов [и др.], Красноярск, Сиб. гос. аэрокос. ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева, 2011-2013. - № рег. в ЦИТиС: 01201154216.

86. История // ПАО «Транснефть» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.transneft.ru/about/story/>

87. Каазик, Ю.А. Математический словарь [Текст] / Ю.А. Каазик. - Таллин: Валгус, 1985. - 296 с.

88. Кадымов, Я.Б. Переходные процессы в системах с распределенными параметрами [Текст] / Я.Б. Кадымов. – М.: Наука, 1968. - 192 с.

89. Караев, Р.А. Сбор и передача информации в АСУ трубопроводами [Текст] / Р.А. Караев, А.А. Левин. – М.: Энергия. 1975. - 103 с.

90. Карелин, В.Я. Насосы и насосные станции [Текст] / В.Я. Карелин, А.В. Минаев. - М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.

91. Кассина, Н.В. Математическое моделирование динамики гидравлических систем с использованием методов аналитической механики и теории нелинейных колебаний: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.02.06 / Кассина Наталья Васильевна. – Нижний Новгород, 2006. – 118 с.

92. Катковник, В.Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание

данных: Метод локальной аппроксимации [Текст] / В.Я. Катковник. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 336 с.

93. Керимов, М.З. Трубопроводы нефти и газа [Текст] / М.З. Керимов. – М.: Наука, 2002. – 256 с.

94. Кирик, Е.С. Об итерационном методе цензурирования данных в задаче оценивания регрессии [Текст] / Е.С. Кирик // Автоматика и телемеханика. – 2007. – №4. – С. 79-91.

95. Ключев, А.С. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов [Текст] / А.С. Ключев, А.Г. Товарнов. - М.: Энергия, 1970. – 280 с.

96. Колмогоров, А.Н. Основные понятия теории вероятностей [Текст] / А.Н. Колмогоров. – М.-Л.: Объед. науч.-техн. изд-во НКТП СССР, 1936. – 81 с.

97. Колмогоров, А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа [Текст] / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. - 624 с.

98. Компания // ПАО «Транснефть» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.transneft.ru/about/>

99. Кошкин, Г.М. Об одной оценке сложной функции распределения и линии регрессии [Текст] / Г.М. Кошкин, В.А. Симахин, Ф.П. Тарасенко // Материалы IV научной конференции по математике и механике. – Томск: ТГУ, 1974. – С. 135-136.

100. Кошкин, Г.М. Об одном подходе к исследованию функционалов от условных распределений при статистической неопределенности [Текст] / Г.М. Кошкин // Автоматика и телемеханика. – 1978. – №8. – С. 53-65.

101. Кошкин, Г.М. О равномерной сходимости в среднеквадратическом непараметрических оценок условных функционалов [Текст] / Г.М. Кошкин // в кн.: Математическая статистика и ее приложения. – Томск: ТГУ, 1979. – С. 39-52.

102. Кошкин, Г.М. Асимптотические свойства непараметрических алгоритмов идентификации и управления для случайных процессов с

непрерывным временем [Текст] / Г.М. Кошкин // Материалы V Всесоюзной Школы-семинара по непараметрическим и робастным методам статистики в кибернетике. – Томск: ТГУ, 1985. – С. 211-221.

103. Красноштанов, А.П. Комбинированные многосвязные системы: монография [Текст] / А.П. Красноштанов. – Новосибирск: Наука, 2001. – 175 с.

104. Красноштанов, А.П. Метод генерации решений на многосвязных системах в условиях неопределенности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Красноштанов Александр Павлович. – Красноярск, 2001. – 295 с.

105. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели [Текст] / П.Д. Крутько. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 304 с.

106. Кузнецова, О.В. Об исследовании непараметрического регулятора [Текст] / О.В. Кузнецова, Н.А. Медведева, А.Н. Пупков // Перспективные материалы, технологии, конструкции: сб. науч. тр. - Вып. 4. - Красноярск: САА, 1998. - С. 346-350.

107. Кузнецова, О.В. Разработка и исследование непараметрических алгоритмов идентификации и управления многомерными стохастическими процессами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Кузнецова Олеся Викторовна. - Красноярск, 2001. – 140 с.

108. Куликовский, Р. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования [Текст] / Р. Куликовский. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. - 380 с.

109. Лаврентьев, М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели [Текст] / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 416 с.

110. Лапко, А.В. Непараметрические алгоритмы восстановления неизвестных зависимостей [Текст] / А.В. Лапко, А.В. Медведев. - ГФАП, 1976. - № 1100-1853.

111. Лапко, А.В. Обучающие системы обработки информации и принятия решений [Текст] / А.В. Лапко С.В. Ченцов, С.И. Крохов, Л.А. Фельдман. – Новосибирск: Наука, 1996. – 296 с.

112. Лапко, А.В. Непараметрические модели коллективного типа [Текст] / А.В. Лапко, В.А. Лапко, М.И. Соколов, С.В. Ченцов. – Новосибирск: Наука, 2000. – 144 с.

113. Лапко, В.А. Синтез и анализ гибридных моделей стохастических зависимостей в условиях наличия их частного описания [Текст] / В.А. Лапко // Автометрия. - 2004. - Т. 40, № 1. - С. 51-59.

114. Лапко, А.В. Непараметрические системы обработки неоднородной информации / А.В. Лапко, В.А. Лапко. – Новосибирск: Наука, 2007. – 174 с.

115. Лапко, А.В. Гибридные модели в задаче восстановления стохастических зависимостей [Текст] / А.В. Лапко, В.А. Лапко // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: сборник трудов конференции. - Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 1095-1100.

116. Лейбензон, Л.С. Гидравлика [Текст] / Л.С. Лейбензон, Д.С. Вилькер, П.П. Шумилов [и др.]. – М.-Л.: Нефтяное изд-во, 1932. – 307 с.

117. Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю.В. Линник : учеб. пособие для вузов. – Л.: ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 349 с.

118. Логинов, К.В. Расчет, оптимизация и управление режимами работы больших гидравлических сетей [Текст] / К.В. Логинов, А.М. Мызников, Р.Т. Файзуллин // Математическое моделирование. - 2006. - т.18. №9. - С. 92-106.

119. Лурье, М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. пособие [Текст] / М.В. Лурье – М.: ФГУП «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.

120. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя [Текст] / Л. Льюнг: пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. - М.: Наука, 1991. - 432 с.

121. Мангалова, Е.С. О проблеме выделения информативных признаков в задаче классификации текстовых документов [Текст] / Е.С. Мангалова, Е.Д.

Агафонов // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – №1 (22). – С. 96-103.

122. Мангалова, Е.С. О проблеме генерации разнообразия ансамблей индивидуальных моделей в задачах идентификации [Текст] / Е.С. Мангалова, Е.Д. Агафонов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: сборник трудов конференции. - Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. - С. 3214-3223.

123. Математическая модель «Cassandra» [Электронный ресурс] // ООО «Энергоавтоматика» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://www.energoavtomatika.ru/index.php/ru/menu-model/menu-cassandra>

124. Медведев, А.В. Непараметрические оценки плотности вероятности и ее производных [Текст] / А.В. Медведев // Автоматизация промышленного эксперимента. - Фрунзе: Илим, 1973.- С. 22-31.

125. Медведев, А.В. Об идентификации линейных динамических систем [Текст] / А.В. Медведев // Алгоритмы и программы в системах обработки экспериментальных данных. - Фрунзе: Илим, 1975. - С. 14-26.

126. Медведев, А.В. Адаптация в условиях непараметрической неопределенности [Текст] / А.В. Медведев // Адаптивные системы и их приложения. - Новосибирск: Наука, 1978. - С. 4-34.

127. Медведев, А.В. Непараметрические системы адаптации [Текст] / А.В. Медведев. - Новосибирск: Наука, 1983. - 176 с.

128. Медведев, А.В. Теория непараметрических систем. К-модели [Текст] / А.В. Медведев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. - 2011. - Вып.3 (36). - С. 57-62.

129. Медведев, А.В. Основы теории адаптивных систем : монография [Текст] / А.В. Медведев. – Красноярск: Изд-во Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та, 2015. – 526 с.

130. Медведева, Н.А. Непараметрические оценки производных кривой регрессии в системах информатизации управления [Текст] / Н.А. Медведева // Тезисы докладов научн.-техн. конференции «Проблемы техники и технологии

XXI века», Красноярск: КГТУ, 1994. - С. 10.

131. Медведева, Н.А. Непараметрические модели и регуляторы [Текст] / Н.А. Медведева // Известия Вузов: Физика. – 1995. - № 9. - С. 124-129.

132. Медведева, Н.А. Непараметрические оценки производной кривой регрессии и модели динамики / Н.А. Медведева // Межвузовский сб. науч. статей «Информатика и процессы управления», Красноярск: изд-во КГТУ, 1995. - С. 74-81.

133. Медведева, Н.А. О непараметрической идентификации динамических систем с запаздыванием [Текст] / Н.А. Медведева // Материалы Международной научн.-техн. конференции «Микропроцессорные системы автоматики», Новосибирск: НГТУ, 1996. - С. А20-А22.

134. Медведева, Н.А. О непараметрических оценках производной плотности вероятности и кривой регрессии [Текст] / Н.А. Медведева // Межвузовский сборник научных трудов «Статистические методы оценивания и проверки гипотез», Пермь: изд-во ПГУ, 1996. - С. 59-67.

135. Медведева, Н.А. О линейности динамических систем [Текст] / Н.А. Медведева // В сб. : Информатика и системы управления. - Красноярск: изд-во КГТУ, 1997. - С. 148-154.

136. Мееров, М.В. Оптимизация систем многосвязного управления [Текст] / М.В. Мееров, Б.Л. Литвак. - М.: Наука, 1972. - 344 с.

137. Мееров, М.В. Многосвязные системы управления [Текст] / М.В. Мееров, А.В. Ахметзянов, Я.М. Берщанский, В.Н. Кулибанов [и др.]. - М.: Наука, 1990. - 264 с.

138. Миронов, А.Г. О проблеме имитационного моделирования процессов в магистральном трубопроводе с применением MATLAB/ SIMHYDRAULICS [Текст] / А.Г. Миронов, Е.Д. Агафонов // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики: материалы 6-й науч.-практ. Internet-конф. – Ульяновск: SIMJET, 2015. - С. 228-234.

139. Миронов, А.Г. Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 1.0. / А.Г. Миронов, Е.Д. Агафонов // Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660260 от 09.09.2016.

140. Миронов, А.Г. Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 2.0. / А.Г. Миронов, Е.Д. Агафонов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018610986 от 19.01.2018.

141. Модуль Pipe Flow (Течение в трубопроводах) // COMSOL Inc. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/pipe-flow-module>

142. Мудров, А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль [Текст] / А.Е. Мудров. - Томск: МП «РАСКО», 1991. - 272 с.

143. Мызников, А.М. Решение больших систем нелинейных уравнений применительно к задачам расчета гидравлических, тепловых и электрических сетей [Текст] / А.М. Мызников // Математические структуры и моделирование. - 2003. - Вып. 11. - С. 15-19.

144. Мызников, А.М. Моделирование и идентификация параметров сложных гидравлических сетей: дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Мызников Алексей Михайлович. – Тюмень, 2005. – 116 с.

145. Мызников, А.М. Уточнение коэффициентов сопротивления в сложных гидравлических сетях по результатам ограниченного числа измерений [Текст] / Р.Т. Файзуллин, А.М. Мызников // Теплофизика и аэромеханика. - 2005. - т.12. №3. - С. 513-516.

146. Мызников, М.О. Сравнительный анализ удельных показателей транспортировки нефти на технологических участках [Текст] / М.О. Мызников, Е.В. Исакова, А.С. Куликов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. - №4. - С. 36-41.

147. Надарая, Э.А. Об оценке регрессии [Текст] / Э.А. Надарая // Теория вероятности и ее применения. - 1964. - Т.9, №1. - С. 157-159.

148. Надарая, Э.А. Непараметрические оценки кривой регрессии [Текст] / Э.А. Надарая // Труды ВУАН ГрССР. - 1965. - Вып. 5. - С. 56-68.

149. Надарая, Э.А. Замечания о непараметрических оценках плотности вероятности и кривой регрессии [Текст] / Э.А. Надарая // Теория вероятностей и ее применение. - 1970. - Т. 15. Вып. 1. - С. 139-142.

150. Надарая, Э.А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии [Текст] / Э.А. Надарая. - Тбилиси: Тбил. гос. ун-т, 1983. - 194 с.

151. Нестеров, Е.Т. Волоконно-оптическая система мониторинга протяжённых объектов (нефтепроводов) на основе когерентного рефлектометра / Е.Т. Нестеров, К.В. Марченко, В.Н. Трещиков, А.В. Леонов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2014, №1. - С. 25-28.

152. Николаев, А.К. Модернизация систем управления магистральными нефтепроводами [Текст] / А.К. Николаев, К.В. Быков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №12. - С. 300-303.

153. Об организации // АО «Транснефть - Диаскан» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://diascan.transneft.ru/about/>

154. О проведении технического обслуживания системы учета электроэнергии объектов ОАО «АК «Транснефть» // ООО «ТранснефтьЭнрго» [Электронный ресурс]. – 26.06.2015. – Режим доступа: <https://transneftenergo.transneft.ru/press/news/?id=22522>

155. ОР-23.040.00-КТН-171-17 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Порядок планирования режимов работы магистрального трубопровода

156. Ордынцев, В.М. Математическое описание объектов автоматизации [Текст] / В.М. Ордынцев. - М.: Машиностроение, 1965. - 360 с.

157. Орловская, Н.Ф. Совершенствование переработки нефтей севера Красноярского края на малых нефтеперерабатывающих заводах: монография / Н.Ф. Орловская, И.В. Надейкин, Е.Д. Агафонов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2013. – 135 с.

158. Панченко, Т.В. Генетические алгоритмы : учеб.-метод. пособие [Текст] / Т.В. Панченко. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.

159. Перегудов, Ф.И. Основы системного анализа [Текст] / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. - Томск: Изд-во НТЛ, 1997. - 396 с.

160. Положение ОАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе»; утверждено советом директоров ПАО «Россети» (протокол от 22.02.2017 № 252) // ПАО «Россети» [Электронный ресурс]. - Москва, 2013. – Режим доступа: <https://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/tehpolitika.pdf>

161. Построение системы диспетчерского контроля и управления технологическим процессом транспортировки нефти // АО «ЭлеСи» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://elesy.ru/company/projects/sdku.aspx>

162. Предеин, О.И. Концепция отдела главного технолога АО «Транснефть - Север» в рамках системы энергетического менеджмента [Текст] / О.И. Предеин, В.В. Казаков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015 (3) С. 62-68.

163. Пупков, А.Н. Синтез и исследование многоканального непараметрического регулятора линейных динамических систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Пупков Александр Николаевич. – Красноярск, 2003. – 132 с.

164. Райбман, Н.С. Что такое идентификация [Текст] / Н.С. Райбман. - М.: Наука, 1970. - 120 с.

165. Райбман, Н.С. Адаптивные модели в системах управления [Текст] / Н.С. Райбман, В.М. Чадеев. - М.: Сов. радио, 1966. - 160 с.

166. Райбман, Н.С. Построение моделей процессов производства [Текст] / Н.С. Райбман, В.М. Чадеев. - М.: Энергия, 1975. - 376 с.

167. Растринин, Л.А. Современные принципы управления сложными объектами [Текст] / Л.А. Растринин. - М.: Сов. радио, 1980. - 232 с.

168. Растригин, Л.А. Введение в идентификацию объектов управления [Текст] / Л.А. Растригин, Н.Е. Маджаров. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
169. Растригин, Л.А. Адаптация сложных систем [Текст] / Л.А. Растригин. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
170. РД-153-39.4-113-01 Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов. Дата введения 01.07.2002 г. (взамен ВНТП 2-86).
171. РД-75.180.00-КТН-255-14 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Методика расчета нестационарных технологических режимов работы магистральных трубопроводов
172. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – Дата введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.
173. Ротач, В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования [Текст] / В.Я. Ротач. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
174. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
175. Рубан А.И. Методы анализа данных: учеб. пособие: в 2 ч. [Текст] / А.И. Рубан. – Красноярск: КГТУ, 1994.
176. Рубан, А.И. Анализ непараметрических регрессионных оценок [Текст] / А.И. Рубан, В.Л. Сергеев // В кн.: Системы управления. Вып. 1. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1975. - С. 85-95.
177. Руднев, А.П. Исследование непараметрических алгоритмов идентификации динамических объектов [Текст] / А.П. Руднев // В кн. : Системы управления. - Томск: ТГУ, 1977. - С. 58-72.
178. Румшицкий, Л.З. Элементы теории вероятностей [Текст] / Л.З. Румшицкий. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. - 240 с.
179. Рыжевский, О.Н. К расчету оптимальных режимов работы магистрального нефтепровода [Текст] // Нефтяная промышленность: сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1965. – №

2. - С. 3-5.

180. Рыжевский, О.Н. Универсальный модуль в задачах оперативного управления нефтепроводом [Текст] / О.Н. Рыжевский, В.В. Сидоров // Нефтяная промышленность: сер. Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – М.: ВНИИОЭНГ, 1978. – № 6. – С. 22-25.

181. Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование: теория и технологии [Текст] / Ю.И. Рыжиков. – М.: Альтекс, 2004. – 384 с.

182. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. - 592 с.

183. Самарский, А.А. Теория разностных схем. – 3-е изд., испр. [Текст] / А.А. Самарский. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 616 с.

184. Сейдж, Э.П. Идентификация систем управления [Текст] / Э.П. Сейдж, Дж. Л. Мелса. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. - 248 с.

185. Сергеева, Н.А. Непараметрические алгоритмы идентификации и управления линейными динамическими системами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.14 / Сергеева Наталья Александровна. - Красноярск, 1998. – 152 с.

186. Современные методы идентификации систем [Текст]; пер. с англ. под ред. П. Эйкхоффа. - М.: Мир, 1983. - 400 с.

187. Солодовников, В.В. Теория автоматического управления техническими системами: учеб. пособие [Текст] / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. - М.: Изд-во МГТУ, 1993. - 492 с.

188. Способ диагностики насосных агрегатов магистрального нефтепровода : Пат. RU 2478833 Рос. Федерация. G01M15, F04B51 / З.Х. Ягубов, В.В. Токарев, И.А. Дементьев, С.В. Полетаев ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ухтинский государственный технический университет" ; RU2011117737A ; заявл. 10.11.2012 ; опубл. 10.04.2013.

189. Справочник по теории автоматического управления [Текст]; под ред. А.А. Красовского. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 712 с.

190. Тарасенко, Ф.П. Непараметрическая статистика [Текст] / Ф.П.

Тарасенко. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. - 292 с.

191. Твердохлеб, И.Б. Нефтяные магистральные насосы: параллельное или последовательное включение на НПС? [Текст] / И.Б. Твердохлеб [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2011. - №2 (2). - С. 17-19.

192. Теория автоматического управления. Ч.2.: Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления [Текст]; под ред. А.А. Воронова. - М.: Высшая школа, 1977. - 288 с.

193. Техника и технология транспорта и хранения нефти и газа [Текст] / Ф.Ф. Арбузова, Р.А. Алиев, В.Ф. Новоселов [и др.]; под ред. В.Ф. Новоселова. – М.: Недра, 1992. – 320 с.

194. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики. - 6-е изд., испр. и доп. [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. - М.: Изд-во МГУ, 1999. — 798 с.

195. Тмур, А.Б. Методы идентификации технологического процесса трубопроводного транспорта нефти : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Тмур Антон Борисович. – М., 2014. – 114 с.

196. "Транснефти" нужно больше безопасности // ПАО «Транснефть» [Электронный ресурс]. – 15.12.2017. – Режим доступа: <https://www.transneft.ru/pressReleases/view/id/11718/>

197. Трофимов, В.В. Автоматизированное управление магистральными нефтепроводами [Текст] / В.В. Трофимов, В.П. Тарасенко, В.И. Мащенко. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. – 247 с.

198. Трубопроводный транспорт нефти [Текст] / Г.Г. Васильев, Г.Е. Коробков, А.А. Коршак [и др.]: под ред. С.М. Вайнштока: в 2 т. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002.

199. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Справочное пособие: в 2 т. [Текст]; под общ. ред. Ю.В. Лисина. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2017. – Т.1. – 494 с.

200. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Справочное пособие: в 2 т. [Текст]; под общ. ред. Ю.В. Лисина. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2017. – Т.2. – 519 с.

201. Тугунов, П.И. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов: учеб. пособие для вузов [Текст] / П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.А. Коршак, А.М. Шаммазов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – 658 с.

202. Узел учета нефти: СИКН СИКНС СИКНП // Компания «IMS» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://www.imsholding.ru/sikn/>

203. Файзуллин, Р.Т. О решении нелинейных алгебраических систем гидравлики [Текст] / Р.Т. Файзуллин // Сибирский журнал индустриальной математики. – 1999. - Т.2, №2. - С. 176-184.

204. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/

205. Фельдбаум, А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем [Текст] / А.А. Фельдбаум. – М.: Физматлит, 1963. – 552 с.

206. Фельдбаум, А.А. Теоретические основы связи и управления [Текст] / А.А. Фельдбаум, А.Д. Дудыкин, А.П. Мановцев, Н.Н. Миролубов. - М.: Физматгиз, 1963. - 932 с.

207. Фельдбаум, А.А. Методы теории автоматического управления [Текст] / А.А. Фельдбаум, А.Г. Бутковский. - М.: Наука, 1971. - 744 с.

208. Фонарев, З.И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности [Текст] / З.И. Фонарев. – Л.: Недра, 1984. – 148 с.

209. Хардле, В. Прикладная непараметрическая регрессия [Текст] / В. Хардле. - М.: Мир, 1993. – 349 с.

210. Цыпкин, Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах [Текст] / Я.З. Цыпкин. - М.: Наука, 1968. - 400 с.

211. Цыпкин, Я.З. Основы теории обучающихся систем [Текст] / Я.З.

Цыпкин. - М.: Наука, 1970. - 252 с.

212. Цыпкин, Я.З. Основы информационной теории идентификации [Текст] / Я.З. Цыпкин. - М.: Наука, 1984. - 320 с.

213. Чайка, С.Н. К идентификации динамических систем класса Гаммерштейна при частично параметризованной структуре модели [Текст] / С.Н. Чайка // В кн. : Динамика систем: Управление и оптимизация. - Горький: Изд-во Горьковского гос. ун-та, 1989. - С. 24-36.

214. Чарный, И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах [Текст] / И.А. Чарный. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1975. - 296 с.

215. Чириков, С.В. Концепция построения системы диспетчерского контроля и управления (СДКУ) АК «ТРАНСНЕФТЬ» [Текст] / С.В. Чириков, Б.И. Мисевичус, В.А. Саенко // Трубопроводный транспорт нефти. – М.: ТрансПресс, 1996. – №9. - С. 7-20.

216. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука [Текст] / Р. Шеннон; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – М. : Мир, 1978. – 418 с.

217. Широков, Н.Н. Введение в механику жидкости и газа [Текст] / Н.Н. Широков, Э.Н. Вознесенский. – М.: МФТИ, 2007. – 324 с.

218. Шифринсон, Б. Л. Основной расчет тепловых сетей. Теория и методы расчета [Текст] / Б. Л. Шифринсон. - М., Л. : Госэнергоиздат, 1940. - 188 с.

219. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния [Текст] / П. Эйкхофф. - М.: Мир, 1975. - 684 с.

220. Энергетическая политика // АО «Транснефть – Энерготерминал» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа:

<https://energyterminal.transneft.ru/ystoichivoe-razvitie/energeticheskaya-politika/>

221. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г [Электронный ресурс] / Министерство энергетики Российской Федерации. – 2009. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/node/1026>

222. Эффект – миллиарды // ООО «ТранснефтьЭнрго» [Электронный ресурс]. – 12.01.2016. – Режим доступа: <https://transneftenergo.transneft.ru/press/articles/?id=24012>

223. Юкин, А.Ф. Управление тепловыми режимами транспорта вязких и застывающих нефтей и нефтепродуктов: дис. ... докт. техн. наук: 25.00.19 / Юкин Аркадий Федорович. - Уфа, 2004. – 324 с.

224. Agafonov, E.D. Application Of Non-parametrical Approach For Linear Dynamical Systems Identification / E.D. Agafonov, O.A. Ikonnikov, E.S. Kirik, O.V. Kuznetsova, A.N. Pupkov, N.A. Sergeeva // Материалы Международной научно-технической конф. «Информационные системы и технологии ИСТ'2000». - Том 2. - Новосибирск: НГТУ, 2000. - С. 337-342.

225. Agafonov, E. Application of Non-Parametric Approach to the Rapid Thermal Processing Systems Modeling [Text] / E. Agafonov // Proceedings Of The 6th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists: Modern Techniques and Technology, MTT 2000, Tomsk, (2000). Pp. 65-67.

226. Agafonov, E. Non-parametrical Algorithms of Identification and Control for Dynamical Processes / E. Agafonov, N. Vassilenko, O. Ikonnikov, O. Kuznetsova, N. Sergeeva, A. Pupkov // Proceedings of the IASTED International Symposia "Applied Informatics 2001" M.H. Hamza (Ed.) - ACTA Press, Anaheim-Calgary-Zurich, 2001. - Pp. 289-294.

227. Agafonov, E.D. On Discrete Nonparametric Controller for Dynamic Systems / E.D. Agafonov, A.N. Pupkov // Computer Data Analysis and Modeling: Robustness and Computer Intensive Methods: Proc. of the Sixth International Conference. Vol. 1. – Minsk: BSU, 2001. - Pp. 24-30.

228. Agafonov, E.D. On Nonparametric Control of a Dynamic System [Text] / E.D. Agafonov, A.V. Shishkina // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 711-718.
229. Agafonov, E.D. Non-parametric Models of Multiply Connected Systems in Conditions of Uncertainty / E.D. Agafonov, A.P. Krasnoshtanov, I.A. Krasnoshtanova, V.V. Sinelnikov // Труды Пятого международного симпозиума «Интеллектуальные системы». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - С. 176-178.
230. Agafonov E. Oil Pipeline Pressure Measurements Forecasting and Correction [Text] / E. Agafonov, N. Antropov // Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Methods in Cybernetics and System Analysis - AMSA'2017, Krasnoyarsk, Russia: Proceedings of the International Workshop, 2017. Pp. 270-278.
231. Agafonov, E.D. Using Non-parametrical Approach in Dynamical Systems Modeling / E.D. Agafonov, O.A. Ikonnikov, O.V. Kuznetsova, A.N. Pupkov, N.A. Sergeeva // Intelligent Systems: Proceedings of the Fourth International Symposium, ed. by K.A. Pupkov, Moscow, RUSAKI, 2000. - Pp. 183-186.
232. Anderson, John D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill, 1995. - 547 p.
233. Blasius, H., Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten, Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, vol.131, VDI-Verlag Berlin, 1913.
234. Breiman, L. Classification and regression trees / L. Breiman, J.H. Friedman, R.A. Olshen, C. J. Stone. - Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1984.
235. Breiman, L. Bagging Predictors // Machine Learning. - 1996. - Vol. 24, Issue 2. - Pp. 123-140.
236. Breiman, L. Random Forests // Machine Learning. - 2001. - 45 (1). – Pp. 5-32.
237. Bukhtoyarov, V. [et al.] Identification of hydraulic resistance parameters

in hydraulic network model [Text] / V. Bukhtoyarov, E. Agafonov, N. Antropov, V. Tynchenko, V. Tynchenko // Journal of Applied Engineering Science, 2018, 16 (2). Pp. 267-273.

238. Centrifugal Pump // The MathWorks, inc. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/centrifugalpump.html?searchHighlight=Centrifugal%20Pump>.

239. Constant Volume Hydraulic Chamber // The MathWorks, Inc. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/constantvolumehydraulicchamber.html?searchHighlight=Constant%20Volume%20Hydraulic%20Chamber>

240. Custom Hydraulic Fluid [Электронный ресурс] : Центр документации физического моделирования Mathworks. – Режим доступа : <http://uk.mathworks.com/help/physmod/Simscape/ref/customhydraulicfluid.html>

241. Elsharkwy, A.M. Comparing classical and neural regression techniques in modeling crude oil viscosity / A.M. Elsharkwy, R.B.C. Gharbi // Advances in Engineering Software. Vol. 32, Issue 3, 2000, Pp. 215-224.

242. Flowmaster V7 – инженерное программное обеспечение для расчета сложных гидравлических и тепловых систем для несжимаемой и сжимаемой среды [Электронный ресурс] : Сайт компании Axis Engineering – Режим доступа : <http://www.axis-tech.ru/page/Flowmaster>.

243. FlowVision // Инжиниринговая компания ТЕСИС [Электронный ресурс]. – 2015. М. – Режим доступа: <http://www.thesis.com.ru/software/flowvision/>

244. Fluid Inertia // The MathWorks, inc. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/fluidinertia.html?searchHighlight=Fluid%20Inertia>

245. Greblicki, W. Nonparametric Identification of Wiener Systems / W. Greblicki // IEEE Trans. on Information Theory. - 1992. - Vol.38, No.5. - Pp. 1487-1493.

246. Himr, D. Numerical simulation of water hammer in low pressurized pipe: comparison of SimHydraulics and Lax-Wendroff method with experiment / D. Himr: EPJ Web of Conferences, 2014.

247. Hružík, L. Non-stationary flow of hydraulic oil in long pipe: Non-stationary flow of hydraulic oil in long pipe / L. Hružík, A. Bureček, M. Vašina. EPJ Web of Conferences, 2014.

248. Hružík, L. Effect of oil viscosity on pulsating flow in pipe / L. Hružík, A. Bureček, M. Vašina // Mechanisms and Machine Science. Vol. 44, 2017, Pp. 137-143.

249. Hydraulic Constant Flow Rate Source [Электронный ресурс] : Центр документации физического моделирования Mathworks. – Режим доступа : <http://uk.mathworks.com/help/physmod/Simscape/ref/hydraulicconstantflowratesource.html>

250. Hydraulic Constant Pressure Source [Электронный ресурс] : Центр документации физического моделирования Mathworks. – Режим доступа : <http://uk.mathworks.com/help/physmod/Simscape/ref/hydraulicconstantpressuresource.html>

251. Hydraulic Resistive Tube // The MathWorks, Inc. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/hydraulicresistivetube.html>

252. James, G. An Introduction to Statistical Learning : with Applications in R / G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani. – Springer, 2013. – 426 p.

253. Kearns, M. Thoughts on Hypothesis Boosting / M. Kearns // Machine Learning class project, 1988. URL: <http://www.cis.upenn.edu/~mkearns/papers/boostnote.pdf>

254. Kiefer J. Stochastic estimation of the maximum of a regression function / J. Kiefer, J. Wolfowitz // Ann. Math. Statist. – 1952. - Vol. 23, № 3. - Pp. 462-466.

255. Kuznetzova, O.V. Nonparametric modeling of linear dynamic systems based on Wiener-Hopf equation / O.V. Kuznetzova // CDAM. - 2001. - Vol.3. - P. 200-206.

256. Li, S. Modeling of hydraulic pipeline transients accompanied with cavitation and gas bubbles using parallel genetic algorithms / S. Li, C. Yang, D. Jiang // Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME Vol. 75, Issue 4, July 2008, Pp. 0410121-0410128.

257. Mangalova, E. Time Series Forecasting using Ensemble of AR models with Time-Varying Structure / E. Mangalova, E. Agafonov // Proceedings of IEEE Evolving and Adaptive Intelligent Systems 2012, Universidad Carlos III de Madrid, 2012. - Pp. 198-203.

258. Mangalova, E. Wind Power Forecasting Using K-nearest Neighbors Algorithm / E. Mangalova, E. Agafonov // International Journal of Forecasting. – 2014. - №3. - Pp. 402–406.

259. Medvedev, A.V. Identification and Control For Linear Dynamic Systems for Unknown Order / A.V. Medvedev // Optimization Techniques IFIP Technical Conference / Berlin – Heidelberg – New-York: Springer Verlag, 1975. - P. 48-55.

260. Medvedeva, N.A. Nonparametrical Estimation of Statistical Characteristics in Problems of Modeling / N.A. Medvedeva // Computer Data Analysis and Modeling. - Minsk: BSU, 1995. - P. 89-93.

261. Medvedeva, N.A. Nonparametric Modeling Algorithms of Dynamic Processes / N.A. Medvedeva // Proceedings of the Fifth International Conference CDAM. - Vol.2. Minsk, 1998. - P. 5-10.

262. Mironov, A. Condition monitoring of operating pipelines with operational modal analysis application / A. Mironov, P. Doronkin, A. Priklonsky, I. Kabashkin // Transport and Telecommunication. Vol. 16, Issue 4, December 2015, Pp. 305-319.

263. Parzen, E. On estimation of a probability density function and mode / E. Parzen // Ann. Math. Statist. - 1962. - V. 33, № 3. - Pp. 1065-1076.

264. Pipe Flow Module // Comsol Multiphysics – ПО для мультифизического моделирования [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/pipe-flow-module>

265. PipelineStudio // Emerson [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/emerson-pipelinstudio>

266. Robbins, H. A stochastic approximation method / H. Robbins, S. Monro // Ann. Math. Statist. – 1951. - Vol. 22, № 3. - Pp. 400-407.

267. Rosenblatt, M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function / M. Rosenblatt // Ann. Math. Statist. - 1956. - V.27, № 3. - Pp. 832-835.

268. Rouban, A.I. Nonparametric Dispersing Identification / A.I. Rouban // Advances in Modeling & analysis. Series D: Mathematical tools. General computer tools. - 1998. - Vol.1. №2. - Pp. 43-50.

269. Rukthong, W. Computational fluid dynamics simulation of a crude oil transport pipeline: Effect of crude oil properties / W. Rukthong, P. Piumsomboon, W. Weerapakkaron, B. Chalermssinsuwan // Engineering Journal. Vol. 20, Issue 3, 19 August 2016, Pp. 145-154.

270. Rukthong, W. Integration of computational fluid dynamics simulation and statistical factorial experimental design of thick-wall crude oil pipeline with heat loss / W. Rukthong, W. Weerapakkaron, U. Wongsiriwan, P. Piumsomboon, B. Chalermssinsuwan // Advances in Engineering Software. Vol. 86, 1 August 2015. Pp. 49-54.

271. Shatalin, S. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical fiber sensing / S. Shatalin, V. Treschikov, A. Rogers // Appl. Opt., 1998, т. 37, с. 5600.

272. SimHydraulics // MathWorks: центр компетенций [Электронный ресурс]. – 2015. - М. – Режим доступа: <http://matlab.ru/products/simhydraulics>

273. Simscape Language Guide // MathWorks. PDF Documentation for Simscape. – 2014. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. -

Режим доступа: http://www.mathworks.de/help/pdf_doc/physmod/simscape/simscape_lang.pdf

274. Simulink Design Optimization [Электронный ресурс] : Analyze model sensitivity and tune model parameters. – Режим доступа : <http://nl.mathworks.com/products/sl-design-optimization/>

275. Simulink: The MathWorks, inc. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа <http://matlab.ru/products/simulink>
276. Starikov, D.P. Minimization of pump energy losses in dynamic automatic control of pressure in the main oil pipeline / D.P. Starikov, E.I. Rybakov, E.I. Gromakov, O.M. Zamyatina // Future Communication, Information and Computer Science. Proceedings of the International Conference on Future Communication, Information and Computer Science, FCICS 2014, 2015, Pp. 69-71.
277. Synergi Pipeline Simulator // DNV GL AS [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/services/analyse-pipeline-design-and-performance-synergi-pipeline-simulator-5376>
278. Tian, S.-J. Study on simulation of hydraulic pipelines' dynamic characteristic by Simulink software / S.-J. Tian, H. Zhang // Journal of System Simulation. Vol. 18, Issue 5, May 2006, Pp. 1136-1138+1146.
279. Valiant, L. A theory of the learnable / L. Valiant // Communications of the ACM. – 1984. – Vol. 27 (11). - Pp. 1134–1142.
280. Variable Head Tank [Электронный ресурс] : Центр документации физического моделирования Mathworks. – Режим доступа : <http://uk.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variableheadtank.html>
281. Vasel, J. Integrated Power & Automation Systems: Future trends for pipeline system efficiency / J. Vasel // Pipeline and Gas Journal. Vol. 236, Issue 10, October 2009, P.6.
282. Volterra, V. Theory of Functionals and Integral and Integro-Differential Equations / V. Volterra. - New York: Dover Publications, 1959.
283. Wiener, N. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series / N. Wiener - New York: John Wiley, 1949.
284. Zhao, J. Statistical analysis on underload-type pipeline spectra / J. Zhao, K. Chevill, M. Yu, J. Been, S. Keane, G. Van Boven, R. Kania, W. Chen // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. Vol. 7, Issue 4, 1 November 2016, Article number 04016007.
285. Zeng, C. Predicting energy consumption of multiproduct pipeline using

artificial neural networks / C. Zeng, C. Wu, L. Zuo, B. Zhang, X. Hu // Energy. Vol. 66, 1 March 2014, Pp. 791-798.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 АО «Транснефть – Западная Сибирь»
 О.В. Чепурной
 «24» октября 2016 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение систем мониторинга и прогноза динамических распределенных процессов в магистральном нефтепроводе», выполненной Агафоновым Евгением Дмитриевичем, внедрены в АО «Транснефть – Западная Сибирь».

Вид внедренных результатов: имитационная модель технологических процессов
 в магистральном нефтепроводе
 наименование объекта внедрения

Характеристика масштаба внедрения: в составе комплекса аналитических
 процедур отдела главного технолога АО

Форма внедрения: методы прогноза технологических параметров в
 неустановившихся режимах
 методика (метод)

Новизна результатов научно-исследовательской работы: качественно новые
 пионерские, принципиально новые качественно новые, модификация, модернизация старых разработок

Опытно-промышленная проверка: подтверждена результатами экспертизы

Внедрены в работу: отдела главного технолога

Годовой экономический эффект: не указан

Удельная экономическая эффективность внедренных результатов: не указана

Объем внедрения: не определен

Социальный и научно-технический эффект: усовершенствован инструментарий
 средств экспресс-анализа переходных технологических режимов
 охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.

От исполнителя

Директор Института нефти и газа
 Сибирского федерального университета

Н.Н. Довженко



Проректор по науке и международному
 сотрудничеству Сибирского
 федерального университета

С.В. Верховец



СОГЛАСОВАНО

Главный инженер
ОАО «Красноярскнефтепродукт»
А. А. Фельдман
«24» октября 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ОАО «Красноярскнефтепродукт»
С. Б. Берунов
«24» октября 2016 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских
и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение систем мониторинга и прогноза динамических распределенных процессов в магистральном нефтепроводе», выполненной Агафоновым Е.Д., внедрены в ОАО «Красноярскнефтепродукт».

1. Вид внедренных результатов: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ
2. Характеристика масштаба внедрения: В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
3. Форма внедрения: МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ
4. Новизна результатов научно-исследовательской работы: КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ
5. Опытно-промышленная проверка: ПОДТВЕРЖДЕНА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРОВЕДЕННОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ
6. Внедрены в работу: ФИЛИАЛА «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ»
7. Годовой экономический эффект: -
8. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов: -
9. Объем внедрения: -
10. Социальный и научно-технический эффект: УСОВЕРШЕНСТВОВАН ИНСТРУМЕНТАРИЙ СРЕДСТВ ЭКСПРЕСС-ПРОГНОЗА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

От исполнителя

Заместитель директора ИНИГ СОУ
по научной работе

Ю.Н. Безбородов



Ю.Н. Безбородов

Проректор по науке и международному
сотрудничеству Сибирского
федерального университета

С.В. Верхолец



С.В. Верхолец

Начальник нефтебазы «Песчанка»
 АО «Таймырская топливная компания»
 Е. А. Корунец
 «27» _____ 2019 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских
и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение систем мониторинга и прогноза динамических распределенных процессов в магистральном нефтепроводе», выполненной

АГАФОНОВЫМ ЕВГЕНИЕМ ДМИТРИЕВИЧЕМ

ф.и.о. исполнителя

внедрены в АО «Таймырская топливная компания».

Вид внедренных результатов: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ

наименование объекта внедрения

Характеристика масштаба внедрения: В СОСТАВЕ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ И
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕКАЧКИ
НЕФТЕПРОДУКТОВ

Форма внедрения: МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В
НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

методика (метод)

Новизна результатов научно-исследовательской работы: КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ
 пионерские, принципиально новые качественно новые, модификация, модернизация старых разработок

Опытно-промышленная проверка: ПО АНАЛИЗУ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА
МОДЕЛИРОВАНИЯ

Внедрены в работу: НЕФТЕБАЗ КОМПАНИИ

подразделение, отдел, лаборатория

Годовой экономический эффект:

Ожидаемый _____ - _____ Фактический _____ - _____

Удельная экономическая эффективность внедренных результатов: _____ - _____

Объем внедрения: _____ - _____

Социальный и научно-технический эффект: УСОВЕРШЕНСТВОВАН
ИНСТРУМЕНТАРИЙ СРЕДСТВ ЭКСПРЕСС-ПРОГНОЗА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ

охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.

От исполнителя

Директор Института нефти и газа
 Сибирского федерального университета



Л.А. Кравцова

Проректор по науке
 Сибирского федерального университета



М.И. Гладышев



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
 «Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение систем
 мониторинга и прогноза динамических распределенных процессов
 в магистральном нефтепроводе» Е.Д. Агафонова
 в учебный процесс Института нефти и газа
 Сибирского федерального университета

Результаты диссертационной работы Е.Д. Агафонова внедрены в учебный процесс кафедры «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов» при проведении практических занятий по дисциплине «Технологические режимы перекачки нефти и нефтепродуктов».

Выполнение аналитических и расчетных заданий по указанной дисциплине позволило повысить уровень подготовки бакалавров по направлению 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, обеспечить приобретение студентами необходимых компетенций.

Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение, предложенное в диссертационной работе Е.Д. Агафонова, используется при выполнении курсовых и дипломных работ студентов кафедры.

Заведующий кафедрой
 «Проектирование и эксплуатация
 газонефтепроводов»,
 к.т.н., доцент

А.Н. Сокольников

"Утверждаю"

Генеральный директор
ОАО «Красноярская ГРЭС-2»,
к.т.н. А.Б. Паньшин

«29» января 2001 г.

АКТ

о практическом использовании результатов диссертационной работы
Е.Д. Агафонова в интеллектуальной компьютерной системе управления
качеством работы энергоблока Красноярской ГРЭС-2

Энергоблок теплоэлектростанции является сложным техническим сооружением. Одним из его элементов является котлоагрегат, в котором происходит процесс сжигания бурого угля марки Б2 Ирша-Бородинского месторождения. Котлоагрегат оснащен разветвленной сетью регуляторов по различным каналам: регулятором температуры острого пара, расхода питательной воды, регулятором тепловой нагрузки, первичного воздуха и др. В качестве регуляторов используются аналоговые, реализующие пропорциональный, пропорционально-интегральный и другие законы регулирования. Настройка параметров этих регуляторов осуществляется на основании полученных переходных характеристик. Более высокое качество регулирования может быть достигнуто, если наряду с использованием аналоговых средств регулирования ввести внешний контур цифрового управления. В этом случае система управления котлоагрегатом будет представлять собой многоканальную цифро-аналоговую систему. В настоящее время развивается теория построения цифро-аналоговых систем регулирования. При создании данного подхода используются результаты диссертационной работы Е.Д. Агафонова "Разработка и исследование непараметрических алгоритмов идентификации и управления для динамических процессов". Конкретно, используются непараметрические модели, процедура синтеза управляющего устройства, способы настройки его параметров. Кроме того, непараметрические модели применяются при настройке параметров аналоговых регуляторов. Анализ цифро-аналоговой схемы управления котлоагрегатом дает основания ожидать повышения качества регулирования за счет улучшения динамики переходных процессов, что, безусловно, приводит к существенному экономическому эффекту, который может быть оценен при испытаниях системы.

Главный инженер
ОАО «Красноярская ГРЭС-2»

А.П. Каркарин

Приложение Б. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016660260

Программный модуль - симулятор магистрального
нефтепровода, версия 1.0Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Сибирский
федеральный университет» (RU)*Авторы: *Миронов Александр Геннадьевич (RU),
Агафонов Евгений Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2016617587

Дата поступления 14 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 09 сентября 2016 г.Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ


№ 2017611325**Программный модуль последовательного обучения
коллектива непараметрических оценок регрессии**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Сибирский
федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Агафонов Евгений Дмитриевич (RU), Мангалова
Екатерина Сергеевна (RU), Шестернева Олеся Викторовна (RU)*

Заявка № **2016663385**Дата поступления **07 декабря 2016 г.**Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 февраля 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017611650**Программный модуль адаптивного прогноза показаний датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода**Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*Авторы: *Агафонов Евгений Дмитриевич (RU), Антропов Никита Романович (RU)*Заявка № **2016664033**Дата поступления **21 декабря 2016 г.**Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **07 февраля 2017 г.**Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности **Г.П. Ивлиев**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017619632

Программный модуль вероятностного прогнозирования на основе параметрических, непараметрических и гибридных алгоритмов

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Агафонов Евгений Дмитриевич (RU), Мангалова Екатерина Сергеевна (RU)*

Заявка № 2017616503

Дата поступления 04 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 августа 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018610986

Программный модуль - симулятор магистрального
нефтепровода, версия 2.0

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Сибирский
федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Агафонов Евгений Дмитриевич (RU),
Миронов Александр Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2017662261

Дата поступления 28 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 19 января 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев