

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет математики и информатики  
Кафедра информационных и управляющих систем  
Направление подготовки 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника  
Профиль: Автоматизированные системы обработки и управления

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Бушманов

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Исследование алгоритмов адаптивной идентификации параметров линейного объекта без измерения производных его выхода

Исполнитель

студент группы 253-об

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Н.П. Шкарлет

Руководитель

профессор, доктор техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Е.Л. Ерёмин

Нормоконтроль

инженер кафедры

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

В.В. Романико

Благовещенск 2016

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет математики и информатики  
Кафедра информационных и управляющих систем

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой  
\_\_\_\_\_ А.В.Бушманов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**З А Д А Н И Е**

К бакалаврской работе студента Шкарлет Николая Петровича.

1. Тема бакалаврской работы: Исследование алгоритмов адаптивной идентификации параметров линейного объекта без измерения производных его выхода.

(утверждено приказом от 03.06.2016 № 1215-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 27.06.2016 г.

3. Содержание дипломной работы:

- анализ и характеристика предметной области;
- подходы к построению систем управления;
- постановка задачи адаптивной параметрической идентификации;
- синтез алгоритмов адаптивной параметрической идентификации;
- имитационное моделирование в среде MATLAB;

4. Перечень материалов приложения: Simulink-схемы, m-файл для расчета наблюдателя, публикация в сборнике научных трудов.

5. Дата выдачи задания 12.05.2016 г.

Руководитель бакалаврской работы Е.Л. Ерёмин, профессор, доктор техн. наук.

\_\_\_\_\_ Задание принял к исполнению 12.05.2016 \_\_\_\_\_ Н.П.Шкарлет

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 70 с., 20 рисунков, 5 приложения, 30 источников.

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, АЛГОРИТМ, КРИТЕРИЙ ГИПЕРУСТОЙЧИВОСТИ, ЛИНЕЙНЫЙ ОБЪЕКТ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ, НАБЛЮДАТЕЛЬ, ФИЛЬТР-КОРРЕКТОР

В работе исследованы алгоритмы адаптивной идентификации параметров линейного объекта без измерения производных его выхода.

Цель работы – исследование адаптивных алгоритмов идентификации параметров линейного объекта без измерения производных его выхода и в условиях, когда недоступны измерению его переменные состояния.

Основу методологии исследований составляют теория гиперустойчивости и концепция положительности динамических систем. Для решения поставленных задач в работе использовались общие методы математического моделирования; теории автоматического управления, адаптивных систем, дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом, устойчивости дифференциально-разностных уравнений и матриц.

На основании критерия гиперустойчивости были синтезированы алгоритмы адаптивной параметрической идентификации. Проведено имитационное моделирование для систем с наблюдателем и фильтром-корректором. Для моделирования использовался математический пакет MATLAB и среда визуального проектирования Simulink.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Шкарлет Н.П.</i>			ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ЕГО ВЫХОДА	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ерёмин Е.Л.</i>				У	3	86
<i>Н. контр.</i>		<i>Романико В.В.</i>				АмГУ кафедра ИУС		
<i>Утверд.</i>		<i>Бушманов А.В.</i>						

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Анализ и характеристика предметной области	12
1.1 Управляемость	14
1.2 Наблюдаемость	15
1.3 Идентифицируемость	17
1.4 Условие неопределенности объекта управления	18
2 Подходы к построению систем управления	23
2.1 Методы построение систем управления	23
2.2 Концепция гиперустойчивости и положительности в задаче построения адаптивных систем	23
2.3 Этапы беспойсковых систем адаптации	27
2.4 Наблюдатель полного порядка	30
2.5 Фильтр-корректор	33
3 Постановка задачи параметрической идентификации	35
3.1 Понятие об адаптивной параметрической идентификации	35
3.2 Постановка задачи параметрической идентификации с измеряемыми переменными состояния	35
3.3 Постановка задачи параметрической идентификации с быстродействующим наблюдателем полного порядка	38
3.4 Постановка задачи параметрической идентификации с фильтр-корректором	41
4 Синтез алгоритмов адаптивной параметрической идентификации	44
4.1 Синтез алгоритмов параметрической идентификации с измеряемыми переменными состояния	44
4.2 Синтез алгоритмов параметрической идентификации с быстродействующим наблюдателем полного порядка	46
4.3 Синтез алгоритмов параметрической идентификации с фильтр-корректором	48

5 Имитационное моделирование в среде MATLAB	53
5.1 Описание MATLAB	53
5.2 Среда визуального проектирования Simulink	55
5.3 Имитационное моделирования системы с измеряемыми переменными состояния	57
5.4 Имитационное моделирования системы с быстродействующим наблюдателем полного порядка	59
5.5 Имитационное моделирования системы с фильтром-корректором	63
Заключение	66
Библиографический список	68
Приложение А	71
Приложение Б	72
Приложение В	73
Приложение Г	74
Приложение Д	75

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей бакалаврской работе были использованы ссылки на следующие стандарты и нормативные документы:

ГОСТ 19.202-78 ЕСПД Спецификация. Требования к содержанию и оформлению

ГОСТ 19.401-78 ЕСПД Текст программы. Требования к содержанию и оформлению

ГОСТ 19.404-79 ЕСПД Пояснительная записка. Требования к содержанию и оформлению

ГОСТ 34.201-89 КСАС Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем

ГОСТ 34.601-90 КСАС Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания

РД 50-34.698-90 КСАС Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ИНП – интегральное неравенство Попова;

ЛСЧ – линейная стационарная часть;

ННЧ – нелинейная нестационарная часть;

АСПИ – адаптивная система с параметрической идентификацией;

ОИ – объект идентификации;

ОУ – объект управления;

ФК – фильтр-корректор.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

## ВВЕДЕНИЕ

Современная среда обитания человека является довольно сложным механизмом, и сложность эта обусловлена как большим числом связей между компонентами, так и сложностью этих компонент. При таком положении дел пропорционально усложнению среды усложняются и методы ее исследования. По сути процесс исследования окружающих предметов и явлений сводится к исследованию и построению их заменителей – моделей. Как правило, под моделью системы понимается некая иная система, обладающая той же формальной структурой и удовлетворяющая следующим условиям:

- между системными характеристиками модели и оригинала существует требуемое соответствие;
- модель более проста и доступна для изучения и исследования основных свойств оригинала;
- исследование модели не разрушает ее физически.

Если указанные требования выполняются, то становится очевидным следующий факт: основное назначение объекта – модели состоит в получении информации о поведении объекта – оригинала путем проведения экспериментов, т.е. в ходе имитационного моделирования.

Моделирование является наиболее предпочтительным методом исследования систем. Оно позволяет сравнительно простыми средствами изучить свойства системы, изменять ее параметры, вводить целевые характеристики или учитывать ресурсы внешней среды [1]. Моделирование чаще всего используется для проведения:

- исследования системы (до этапа ее проектирования) с целью определения основных характеристик или правил взаимодействия элементов системы между собой и с внешней средой;
- анализа и синтеза системы при проектировании различных вариантов ее структур и выбора наилучшего варианта реализации с учетом ограничений и сформулированного критерия оптимальности;

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

– расчета оптимальных режимов функционирования систем в процессе ее эксплуатации, а также получения прогнозных оценок развития системы.

Задачи, встающие сегодня перед разработчиком системы управления, все чаще требуют для своего решения использования теории адаптивных систем. Сформулировать в общих чертах задачу адаптивного управления легко, но весьма непросто решать конкретные задачи управления нестационарными объектами. Причина этого в том, что адаптивное управление требуется там, где отсутствует или существенно ограничена априорная информация о реальных законах изменения динамических свойств объекта и входных воздействий на систему управления, которые будут иметь место при реальном функционировании системы. Эту информацию необходимо получать в процессе работы системы. Еще одним фактором, существенно затрудняющим развитие общей теории адаптивного управления, является нелинейная нестационарная природа адаптивных систем, свойственная им по определению, невозможность воспользоваться непосредственно столь мощным принципом суперпозиции, лежащим в основе линейной теории управления.

Интенсивное внедрение разнообразных технических систем, в частности систем автоматического управления во все сферы жизни и деятельности человека характеризуется рядом особенностей, в числе которых – повышения требований к качеству процессов управления объектами в различных условиях их функционирования. Так, управляемые объекты могут иметь неизвестные параметры или характеристики, влиянием которых на качество управления раньше пренебрегали. В процессе функционирования систем их параметры могут изменяться непредвиденным образом, что влечет за собой появление неопределенности.

Наличие неопределенности является фундаментальным свойством процесса математического моделирования. Одной из важнейших в математическом моделировании является проблема идентификации, под которой обычно понимается выбор структуры модели (структурная идентификация) и совокупности значений параметров (идентификация параметров), соответствующих выбранной структуре. Поэтому соотнесение структуры данных об объекте моделирования со струк-

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

турой модели является важнейшим этапом процесса идентификации. Уже на этом этапе исследователь часто сталкивается с проблемой неопределенности в виде неоднозначности решения задачи идентификации.

В зависимости от априорной информации об объекте различают задачи идентификации в узком и широком смысле. Задача идентификации в узком смысле состоит в оценивании параметров и состояния системы по результатам исследований входных и выходных переменных в условиях функционирования объекта. При этом известна структура системы и задан класс моделей, к которой объект относится. Априорная информация об объекте достаточна велика.

Априорная информация при идентификации в широком смысле отсутствует или очень бедная, поэтому приходится предварительно решать большое число дополнительных задач. К этим задачам относятся: выбор структуры системы и заданного класса моделей, оценивание степени стационарности и линейности объекта и действующих переменных, оценивание степени и формы влияния входных параметров на выходные, выбор информативных переменных и др.[2]

Требования повышения качества управления объектами в тех случаях когда-либо имеется априорная неопределенность в математическом описании объекта управления, либо характеристики объекта с течением времени изменяются, приводит к необходимости разработки алгоритмов адаптивного управления, позволяющих на этапе синтеза учесть различные требования инженерного проектирования.

При недостатке априорных сведений в теории управления решать задачу – привести к заданной цели – следует не для конкретного, полностью определенного объекта, а для произвольного объекта из некоторого множества. В соответствии с этим алгоритмы адаптивного управления отличаются от алгоритмов классической теории управления, где объект известен до конца, тем, что для приведения к цели объекта из класса можно не знать, какой именно объект подлежит управлению.

Разработка алгоритма управления соответствует этапу синтеза системы – наиболее ответственному при ее создании. Проблема синтеза заключается в отыс-

кании таких алгоритмов, которые решают задачи о придании объекту требуемых свойств. В настоящее время разработка задач синтеза систем адаптивного управления осуществляется на основе прямого метода Ляпунова, метода градиента или критерия гиперустойчивости. В качестве достаточно продуктивного метода, позволяющего синтезировать широкий спектр алгоритмов адаптивного управления, можно считать метод синтеза основанный на сочетании свойств гиперустойчивости и положительности динамических систем.

В работе исследуются алгоритмы адаптивной идентификации параметров линейного объекта без измерения выхода его производных. Построены имитационные модели систем с недоступными для измерения переменными состояниями. Чтобы решить эту задачу применялись дополнительные меры: быстродействующий наблюдатель, фильтр-корректор.

Появление новых и развитие уже существующих методов анализа и синтеза систем управления показывает актуальность этой проблемы ввиду ее многообразия и расширения области применения. Этот факт подтверждается наличием значительного числа публикаций, как в отечественной, так и в зарубежной печати.

Основным методом является синтез по критерию гиперустойчивости и положительности динамических систем. Метод включает в себя следующие этапы:

- 1) получение эквивалентного математического описания системы;
- 2) разрешение интегрального неравенства Попова;
- 3) определение положительности передаточной функции;
- 4) проверка выполнимости целевых условий.

# 1 АНАЛИЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Решение задач анализа и синтеза сложных систем на этапе их проектирования, как правило, предполагает использование некоторых количественных оценок, отражающих как особенности поведения, так и основные свойства исследуемых систем. К числу таких оценок обычно относят эффективность, надежность, помехозащищенность, качество управления, устойчивость, сложность. Если законы поведения систем априорно известны, то указанные оценки могут быть определены теоретически, с использованием аналитических (точных) методов. Если же проведение теоретических исследований затруднено или нереализуемо, по той или иной причине, то оценки получают экспериментально, с помощью активных или пассивных экспериментов, т.е. за счет прямого (непосредственного) съема параметров системы, либо в результате косвенного определения их значений на основе имитационного моделирования, последнее возможно только при наличии соответствующего математического описания системы.

Расширение возможностей современной теории управления, расширение круга теоретических и практических задач, решаемых на базе принципов и методов этой теории, тесно связано с теорией идентификации. В классической теории автоматического регулирования уравнение системы обычно выбиралось или задавалось на основании известной априорной информации об объекте, и анализ и синтез собственно системы управления производился на базе этого уравнения. Однако в связи с усложнением объектов управления, сопровождающимся уменьшением априорной информации о них, а также в связи с необходимостью учета реальных условий функционирования и изменений во времени как характеристик самих объектов, так и условий их функционирования возникла потребность в создании принципов и методов построения моделей объектов управления, на базе которых могли бы при таких обстоятельствах решаться задачи анализа и синтеза системы управления. Проблема построения модели является очень старой, и, по видимому, развитие науки в той или иной мере связано с появлением новых моделей, с желанием отобразить при помощи определенных средств и методов ре-

альную действительность, реально протекающие процессы, реальные явления. Естественно, что к настоящему времени накоплено большое число моделей, которые постоянно используются для решения конкретных задач, и разработано много подходов и методов, дающих возможность построить модель определенного процесса, объекта, явления. Однако идентификация вдохнула в проблему построения модели новую жизнь, выдвинула новые требования, которые непосредственно вытекали из задачи управления [3].

Задачами идентификации является определение структуры и параметров системы управления. При структурной идентификации определяется вид математической модели объекта (структура объекта). При параметрической идентификации сразу определяются коэффициенты передаточной функции и объекта. Непараметрическая идентификация применяется для определения временных или частотных характеристик объектов, а также характеристик случайных процессов, генерируемых объектами.

В данном случае решается задача нахождения параметров объекта идентификации. В классе адаптивных самонастраивающихся (изменение только параметров регулятора) систем с настраиваемой моделью, кроме которого можно выделить: самоорганизующиеся (изменение структуры регулятора) системы, системы с эталонной моделью, интеллектуальные системы, обучающиеся системы.

Успешное применение адаптивных систем управления в различных областях современного промышленного производства в значительной мере связано с обеспечением их работоспособности в условиях нормального функционирования управляемых объектов. Адаптивные системы управления образуют собой широкий класс систем, анализ и синтез которых осложнен структурой этих систем и многообразием их видов. Среди методов прикладного системного анализа имитационное моделирование является самым мощным инструментом исследования сложных систем. По сравнению с другими методами такое моделирование позволяет рассматривать большее число альтернатив, улучшать качество управленческих решений и точнее прогнозировать их последствия. Эффективность его значительно возросла с появлением мощных ЭВМ и развитием специальных языков

программирования и пакетов прикладных программ.

### 1.1 Управляемость

Понятие управляемости связано с переводом системы управления из одного состояния в другое. Управляемость зависит от структуры системы, состава органов управления, значений параметров.

Рассмотрим объект описываемый уравнением

$$\frac{dx}{dt} = f(x,u,t), u = \text{col}(u_1, \dots, u_M). \quad (1)$$

Будем называть вполне или полностью управляемым, если для любой пары точек  $x(t_{нач})$  и  $x(t_{кон})$  существует допустимое управление  $u(t)$  в временном интервале  $[t_{нач}, t_{кон}]$ , приводящее объект из точки  $x(t_{нач})$  в точку  $x(t_{кон})$ .

Для линейного стационарного объекта, динамика которого описывается уравнением вида

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu, x = \text{col}(x_1, \dots, x_N), \\ u &= \text{col}(u_1, \dots, u_M). \end{aligned} \quad (2)$$

в указанном определении (без потери общности) можно положить  $t_{нач} = 0$ , а одну из точек,  $x(t_{нач})$  или  $x(t_{кон})$  считать нулевой, например, определяя перевод объекта из точки  $x(0)$  в точку  $x(t_{кон})$ . Известно, что для объекта (2) критерий управляемости Калмана представляет собой следующее утверждение: линейный объект (2) полностью управляем тогда и только тогда, когда матрица управляемости  $M_{упр} = [B, A \cdot B, A^2 \cdot B, \dots, A^{N-1} \cdot B]$  отвечает требованию

$$\text{rank}(M_{упр}) = N. \quad (3)$$

Из критерия следует, что свойство управляемости объекта целиком и полностью определяется матрицами состояния  $A$  и управления  $B$ , поэтому часто го-

ворят об управляемости пары  $(A, B)$ .

## 1.2 Наблюдаемость

При решении задач автоматического управления, в которых рассматриваются вопросы перевода объекта управления из заданного начального положения в требуемое конечное, обычно допускается, что возможность такого перевода априори существует (свойство управляемости). Однако не всякий объект обладает таким свойством, поэтому необходимо сформулировать как строгое определение, так и критерий управляемости динамического объекта или системы. Кроме того, при реализации систем управления с обратной связью фактически всегда требуется измерять фазовые координаты объекта, но на практике, в подавляющем числе случаев, измерению или наблюдению доступен не вектор фазовых координат  $x$ , а вектор выхода  $y$ , связанный функционально с фазовым вектором или вектором пространства состояния объекта управления. В связи с этим возникает проблема наблюдаемости и восстанавливаемости, суть которой заключается в определении фазового вектора по измерениям вектора выхода.

Определение наблюдаемости: объект, описываемый уравнением состояния

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad y = \text{col}(x_1, \dots, x_N), \quad (4)$$

и уравнение выхода

$$y = \Phi(x, u, t) \quad y = \text{col}(y_1, \dots, y_L), \quad (5)$$

называется полностью наблюдаемым, если существует такое  $s$ , удовлетворяющее условию  $t < s < \infty$ , что по данным измерений  $y(t^*)$ ,  $u(t^*)$ , для всех  $t^* \in [t, s]$ , можно определить (вычислить)  $x(t)$ . Как следует из приведенного определения, полная наблюдаемость означает возможность определения вектора  $x(t)$  по будущим значениям вектора  $y(t)$ , но для большинства задач управления наиболее характерна ситуация, когда текущее состояние объекта должно определяться по уже изме-

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

ренным, т.е. прошлым значениям выхода объекта, иначе говоря, возникает проблема восстанавливаемости вектора состояния объекта управления.

Определение восстанавливаемости: объект

$$\frac{dx}{dt} = f(x,u,t) y = \text{col}(x_1, \dots, x_N), \quad (6)$$

$$y = \Phi(x,u,t) y = \text{col}(y_1, \dots, y_L), \quad (7)$$

называется полностью восстанавливаемым, если существует такое  $s < -\infty < s$ , что по данным измерений  $y(t^*)$ ,  $u(t^*)$ , для всех  $t^* \in [s, t]$ , можно определить  $x(t)$ . Отметим, что для линейных стационарных объектов понятия наблюдаемости и восстанавливаемости обычно не различают, т.к. параметры таких объектов не зависят от времени и не играет роли как рассматривается динамика объекта управления в прошлом (предыстория) или в будущем.

Для линейных стационарных объектов справедлив следующий критерий наблюдаемости: объект, описываемый линейными уравнениями

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, x = \text{col}(x_1, \dots, x_N), \quad (8)$$

$$y = C^T x + Du, y = \text{col}(y_1, \dots, y_L),$$

полностью наблюдаем тогда и только тогда, когда матрица наблюдаемости  $M_{набл} = [C, AT \cdot C, (AT)^2 \cdot C, \dots, (AT)^{N-1} \cdot C]$  отвечает требованию

$$\text{rank}(M_{набл}) = N. \quad (9)$$

Из формулировки данного критерия следует, что свойство наблюдаемости однозначно определяется матрицами состояния  $A$  и выхода  $C^T$ , поэтому часто говорят о наблюдаемости пары  $(A, C^T)$ . Напомним, что матрицу  $D$  в уравнении (8) называют матрицей обхода системы. Можно показать, что свойство наблюдаемо-

сти, также, как и свойство управляемости, не зависит от выбора и линейного преобразования координат пространства состояния системы.

Кроме того, если объект (8) является не полностью наблюдаемым, то фазовое пространство состоит из двух подпространств фазовых координат – подпространства наблюдаемости и подпространства ненаблюдаемости.

При этом для не полностью наблюдаемых объектов важную роль играет понятие обнаруживаемости, которое обычно понимается в смысле следующего определения: объект (8) называется обнаруживаемым, если ненаблюдаемые координаты вектора  $x$ , при нулевых  $x_{набл}(t)$  и  $u(t)$ , удовлетворяют предельному соотношению

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{ненабл}(t) = 0. \quad (10)$$

Кроме того, легко доказывается следующий критерий обнаруживаемости: объект (8) называется обнаруживаемым в том и только том случае, когда матрица  $A$  – гурвицева.

### 1.3 Идентифицируемость

Понятие идентифицируемости (параметрической) является частным случаем наблюдаемости. Параметрическая идентифицируемость представляет собой возможность определения параметров математической модели системы или процесса по результатам измерения определенных выходных величин в течении некоторого времени.

Рассмотрим систему вида

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu, x = \text{col}(x_1, \dots, x_N), \\ y &= C^T x + Du, y = \text{col}(y_1, \dots, y_L), \end{aligned} \quad (11)$$

при заданном  $u(t)$  и точном измерении  $y(t)$  на сколь угодно малом интервале времени требуется указать условие полной наблюдаемости  $x$  и идентифицируемости

матриц параметров  $A, B, C, D$ .

Ранг матрицы

$$N(t_1) = \int_0^{t_1} e^{A(t-t_1)} C^* C e^{A(t-t_1)} dt, \quad (12)$$

равен  $n$ .

С другой стороны, система

$$\frac{dx}{dt} = -A^* x + C^* v, \quad (13)$$

вполне управляема тогда и только тогда, когда ранг матрицы

$$\Phi = \int_0^{t_1} e^{-A(t-t_1)} C^* C e^{-A(t-t_1)} dt, \quad (14)$$

равен  $n$ . Так как матрицы (12), (14) совпадают, то справедливо утверждение: система (11) идентифицируема тогда и только тогда, когда система (13) управляема.

Условие управляемости системы (13) имеет вид:

$$\text{rank}\{C^*, A^* C^*, \dots, A^{*m-1} C^*\} = n. \quad (15)$$

Для того чтобы система (11) была идентифицируемой, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие (15), где  $m$  – степень минимального многочлена матрицы  $A$ .

#### 1.4 Условия неопределенности объекта управления

Для большинства АСУ ТП характерна достаточно высокая степень сложности объекта управления, которая обычно понимается в смысле наличия: большого числа управляющих и возмущающих воздействий; неполной априорной (первоначальной или предварительной) информации о параметрах объекта и свойствах

возмущений; нестационарных и нелинейных статических или динамических характеристик процессов управления. Такая «сложность» объекта управления часто приводит к тому, что управление объектом с использованием «классических» управляющих устройств или регуляторов, т.е. имеющих фиксированные параметры или настройки, не позволяет гарантированно обеспечить желаемое качество его функционирования. В таких условиях, для решения задач управления применяются адаптивные и робастные системы. При этом если адаптивные системы обладают способностью «приспосабливаться» как к изменениям внешних и внутренних условий функционирования объекта управления, так и к наличию соответствующего уровня априорной неопределенности в его математическом описании, то робастные системы достигают поставленных целей управления путем компенсации ограниченных помех и параметрической неопределенности (нестационарности) за счет нелинейных робастных алгоритмов управления. Преодоление уровня априорной неопределенности в робастных адаптивных системах управления может осуществляться различными способами, например, с помощью специального контура адаптации и за счет использования (обработки) апостериорной (текущей или рабочей) информации в процессе нормального функционирования объекта управления, т.е. когда выполняется специальным образом организованная настройка управляющих устройств или регуляторов системы управления. Один из классов адаптивных систем управления – это самонастраивающиеся системы, кроме них, также можно выделить: системы с адаптацией в особых фазовых состояниях (релейные, с переменной структурой и т.д.); обучающиеся системы (с поощрением, самообучающиеся и др.); интеллектуальные адаптивные системы. Рассматривая класс самонастраивающихся систем его классификацию можно представить в виде, изображенном на рисунке 1. К поисковым самонастраивающимся системам относятся системы, у которых работа контура настройки достигается за счет пробных или искусственно организованных отклонений системы. В свою очередь, алгоритмы беспойсковых контуров адаптации опираются на аналитические процедуры, обеспечивающие настройку соответствующих коэффициентов системы в режиме ее обычной или нормальной работы. Поскольку беспойско-

вые самонастраивающиеся системы служат предметом достаточно подробного изучения в дальнейшем, ниже приводится характеристика способов построения только поисковых систем адаптивного управления. Однако отметим, что сравнение поисковых и беспоисковых адаптивных систем управления позволяет сделать вывод о том, что поисковые системы сохраняют свою работоспособность при меньшем объеме априорной информации, чем ее требуется для беспоисковых систем. При этом недостатком поисковых систем, по отношению к беспоисковым, является их невысокое быстродействие, связанное с потерями времени на организацию и проведение поиска. Характерной особенностью поисковых систем является определение некоторого экстремального значения настраиваемых коэффициентов. Если выбор поискового движения осуществляется по заранее заданному правилу или закону, то система является регулярной, если же направление движения к экстремуму определяется методом проб и ошибок, в соответствии с которым удачно найденное решение принимается, а неудачное исключается, то систему считают случайной.

Приведем краткую характеристику основных регулярных методов поиска экстремума.

Метод сканирования представляет собой полный перебор возможных значений управляемого параметра и вычисление значений функционала качества во всех точках перебора, с последующим определением экстремума. Регулярность этого метода связана с априорным заданием порядка перебора значений, чаще всего это способ строчной или спиральной развертки.

Метод градиента использует свойство уменьшения величины градиента функционала по мере приближения к его экстремуму. Процесс поиска обычно разбивается на два этапа. На первом этапе делается пробный шаг для определения величины и направления градиента, а на втором этапе осуществляется фиксированное рабочее смещение всех координат в направлении градиента.

Регулярность метода связана с априорным выбором пробных шагов. Поскольку выбор шагов может иметь различные направления, то и длительность поиска экстремума может быть достаточно большой. Кроме того, при наличии у

функционала качества «оврагов» или «гребней», движение по градиенту может быть очень извилистым.

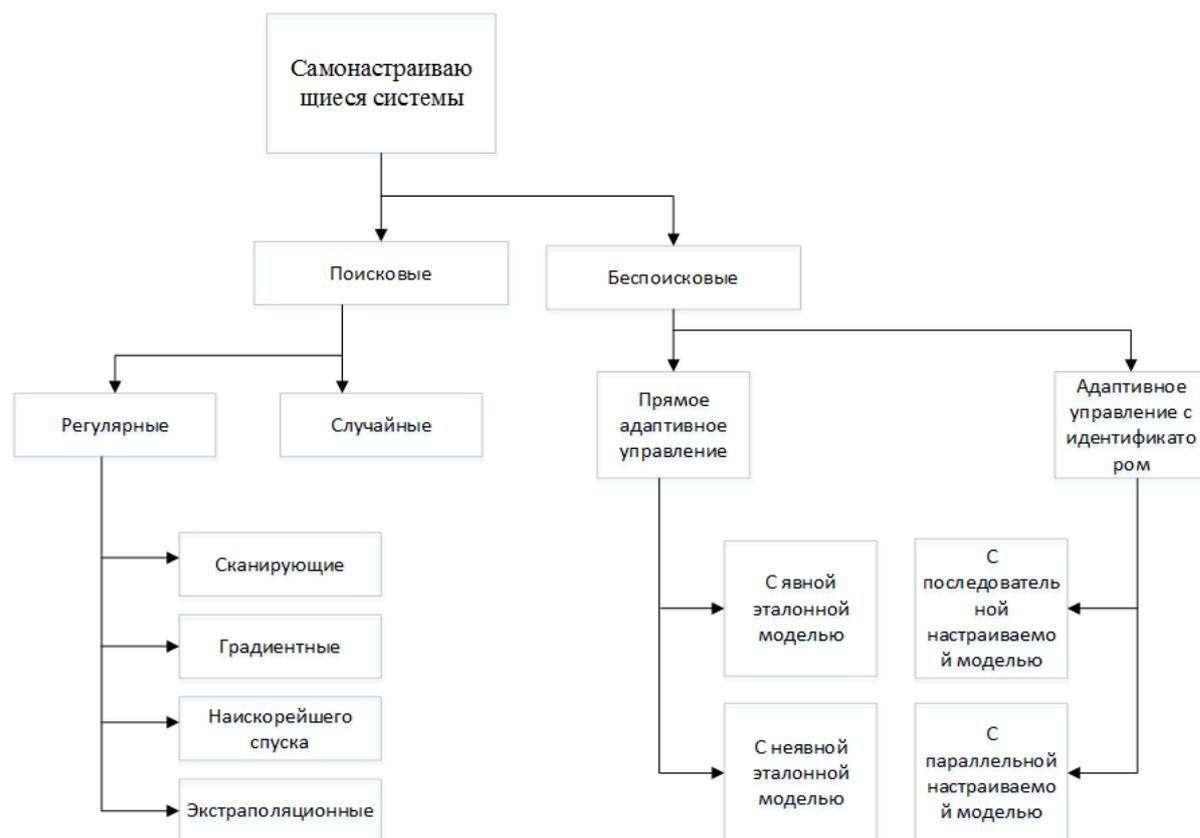


Рисунок 1 – Классификация самонастраивающихся систем

Поскольку выбор шагов может иметь различные направления, то и длительность поиска экстремума может быть достаточно большой. Кроме того, при наличии у функционала качества «оврагов» или «гребней», движение по градиенту может быть очень извилистым.

Метод наискорейшего спуска является модификацией метода градиента, суть которого состоит в том, что рабочий шаг является не рассчитанным заранее, а движение по выбранному направлению происходит до тех пор, пока значение функционала качества продолжает уменьшаться. Затем вновь определяется направление градиента и т.д.

Данный метод по сравнению с методом градиента сокращает время поиска экстремума.

Методы экстраполяционного поиска строятся на основе одного из двух

предположений:

- либо заранее известно значение экстремума функционала качества;
- либо функционал качества представляет собой известную функциональную зависимость от управляемых параметров.

Чаще всего в экстраполяционных методах поиска предполагается возможность замены функционала качества на кусочно-линейную или квадратичную функцию.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

## 2 ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1 Методы построения систем управления

Для построения автоматизированных систем управления используются такие методы как: второй метод Ляпунова, метод синтеза по критерию гиперустойчивости, метод наименьших квадратов.

В данной работе основываясь на критерии гиперустойчивости строятся адаптивные системы с параметрической идентификации.

### 2.2 Концепция гиперустойчивости и положительности в задаче построения адаптивных систем

На этапе проектирования систем автоматизации возникает ряд инженерных проблем, в том числе и проблема, связанная с вопросами устойчивости систем управления. В случае нелинейной системы, наряду с широко применяемым прямым методом Ляпунова или критерием абсолютной устойчивости Попова В.М., исследование устойчивости может основываться и на относительно новых в теории систем понятиях, в частности, на таких понятиях как положительность и гиперустойчивость, объединенных в единый метод рамками критерия гиперустойчивости. Концепция гиперустойчивости автоматических систем была введена в теорию управления В.М. Поповым, который расширил семейство устойчивых в целом нелинейных систем управления с отрицательной обратной связью [4]. Существенное развитие метод синтеза по критерию гиперустойчивости получил в работах В.А. Якубовича [5], И.Д. Ландау [6], Е.Л. Еремина и А. М. Цыкунова [7]. В рамках этого метода все системы управления преобразовывались к структуре систем управления с нелинейной обратной связью. Структура такой системы изображена на рисунке 2.

Напомним, что нелинейная система управления называется устойчивой в целом тогда и только тогда, когда ее фазовые координаты стремятся в начало координат при любых начальных условиях и отсутствии внешних воздействий.

Метод синтеза по критерию гиперустойчивости состоит из следующих этапов:

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		23

- представление исходной системы в эквивалентной форме в соответствии с рисунком 2, в виде линейного стационарного блока прямой цепи и нелинейного нестационарного блока обратной связи;
- разрешение интегрального неравенства В.М. Попова;
- обеспечение строгой положительности передаточной матрицы линейной части системы;
- проверка выполнения целевых условий и свойств адаптивности системы в заданном классе  $\Xi$ .

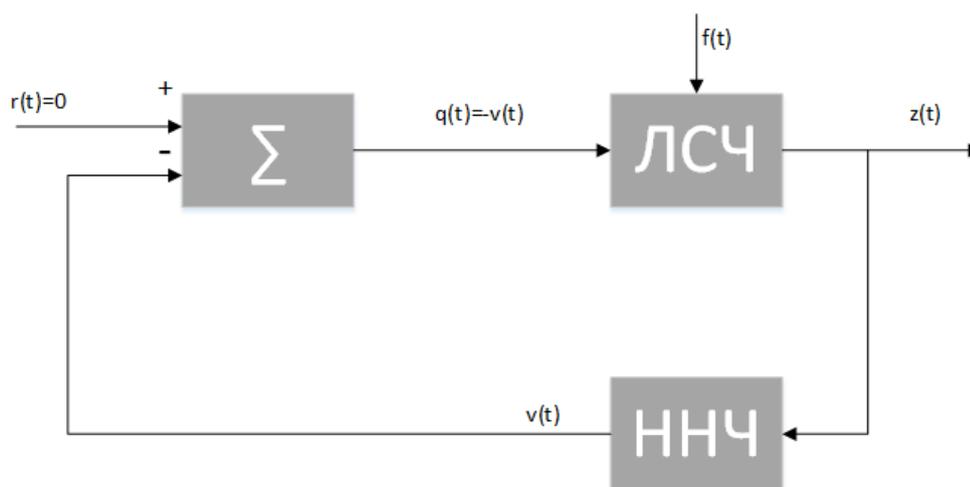


Рисунок 2 – Структурная схемы нелинейной системы первого типа

Рассмотрим замкнутую систему управления в соответствии с рисунком 1, при отсутствии внешних возмущений, т.е.  $f(t) \equiv 0$ . Будем полагать, что линейная часть системы описывается уравнением состояния и уравнением выхода (1):

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= Ae(t) + Bq(t), \\ z(t) &= Jq(t) + L^T e(t), \end{aligned} \tag{16}$$

а описание нелинейной части системы определено уравнением обратной связи вида (2):

$$v(t) = F(z, t), q(t) = -v(t), \quad (17)$$

где  $e(t)$ ,  $z(t)$ ,  $\mu(t)$  – соответственно  $n$ -мерный вектор состояния и  $m$ -мерные векторы выхода и управления,  $m < n$ ;

$F(z, t)$  – векторный функционал;

$A, B, L$  и  $J$  – постоянные матрицы соответствующего размера.

Пара  $(A, B)$  полностью управляема, пара  $(L, A)$  полностью наблюдаема.

Для системы (16), (17), следуя [4], введем так называемую присоединенную систему, т.е. дополним математическое описание рассматриваемой системы следующим интегралом вида

$$h(0, t) = \int_0^t v^T(s) z(s) ds. \quad (18)$$

Присоединенная система (16) – (18) называется гиперустойчивой, если найдутся такие положительные константы  $\delta_0, \delta_1, \gamma_0, \gamma_1$ , что любое решение системы (16) – (18) будет удовлетворять соотношению:

$$\|e(t)\| < \delta_0 + \delta_1 \|e(0)\|, t > 0, \quad (19)$$

а также будет выполняться интегральное неравенство Попова (ИНП)

$$h(0, t) = \int_0^t v^T(s) z(s) ds = -\int_0^t q^T(s) z(s) ds > -\gamma_0 - \gamma_1 \sup_{0 < s < t} \|e(s)\|, \quad (20)$$

где  $\sup_{0 < s < t} \|e(s)\|$  – максимальное значение евклидовой нормы  $\|e(s)\|$ .

ИНП вида (20) при значении  $\gamma_1 = 0$ , может быть и более простым:

$$h(0,t) = \int_0^t v^T(s)z(s)ds > -\gamma_0, t > 0, \quad (21)$$

$$h(0,t) = -\int_0^t q^T(s)z(s)ds > -\gamma_0, t > 0.$$

Присоединенная система будет асимптотически гиперустойчива, если наряду с условиями (20) или (21) выполняется соотношение:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0. \quad (22)$$

Известно, что если для присоединенной системы (16) – (18) показана ее гиперустойчивость, но гиперустойчивой является и система (16), (17). Кроме того, если получены некоторые условия гиперустойчивости для системы (16) – (18), то эти же условия будут определять и гиперустойчивость системы (16), (17). Для установления гиперустойчивости системы (16), (17) ее нелинейная нестационарная часть системы должна удовлетворять интегральному неравенству Попова (20) или (21). Если это требование выполнено, то гиперустойчивость системы будет зависеть только от свойств ее линейной стационарной части, которые можно задать в терминах теории положительности динамических систем.

Для гиперустойчивости системы (16), (17) при выполнении ИНП вида (20) или (21) необходимо и достаточно, чтобы передаточная матрица линейной стационарной части системы, т.е.

$$W(s) = J + L^T (sE - A)^{-1} B, \quad (23)$$

была бы положительно вещественной матрицей, где E – единичная матрица.

Для асимптотической гиперустойчивости передаточная функция должна быть строго положительно вещественной матрицей.

Функция W(s) является положительно вещественной, если выполняются

следующие условия:

- 1)  $W(s)$  – вещественная для всех вещественных  $p$ ;
- 2)  $W(s)$  не имеет полюсов в полуплоскостях  $\text{Re}[p]>0$ ;
- 3) возможные полюсы  $W(s)$  на оси  $\text{Re}[s]=0$  являются различными, а все остальные нулевыми;
- 4) для  $s=j\omega$ , не являющихся полюсом выполняется частотное условие:  
 $\text{Re}[W(j\omega)] \geq 0, \forall \omega$ .

В случае строгой положительности полюсы на оси  $\text{Re}[s]=0$  отсутствуют.

Формированию понятия положительности существенно способствовали результаты, полученные В.А. Якубовичем [8] и Р.Е. Калманом при решении задач о разрешимости уравнений Лурье [9].

Критерий гиперустойчивости позволяет рассматривать проблему устойчивости в целом нелинейной нестационарной системы (1), (2), как следствие, вытекающее из свойств составных частей этой системы, а именно: требований положительности, предъявляемого к линейной стационарной части системы (ЛСЧ), а также выполнения условия ИНП, рассматриваемого относительно ее нелинейной нестационарной части (ННЧ). Другими словами, задача гиперустойчивости системы управления заменяется двумя независимыми задачами, часто называемыми проблемами положительности, раздельное решение которых в значительной степени упрощает процедуру синтеза беспойсковых адаптивных систем с неявной эталонной моделью [7].

### 2.3 Этапы разработки беспойсковых систем адаптации

Первый этап синтеза составляет – нахождение эквивалентного описания системы, т.е. представление ее в виде структуры, изображенной на рисунке 2, и соответствующей математическому описанию вида:

Для ЛСЧ (прямой связи)

$$\frac{de(t)}{dt} = Ae(t) + Bq(t), z_1(t) = g^T L^T e(t); \quad (24)$$

Для ННЧ (обратная связь)

$$q(t) = -F(z_0(t)). \quad (25)$$

На втором этапе обеспечивается разрешение ИНП, записанном в следующем виде:

$$h(0, t) = \int_0^t q^T(s) z_1(s) ds = -\int_0^t F^T(z_1(s)) z_1(s) ds > -\gamma_0, \forall t > 0, \quad (26)$$

что по существу приводит к нахождению или синтезу некоторого явного вида векторного (или скалярного) функционала  $F(z_0(t))$  из условия выполнения ИНП.

На третьем этапе осуществляется решение проблемы положительности ЛСЧ, что означает определение в условиях априорной неопределенности числовых значений элементов вектора  $g$ , исходя из выполнения требований и накладываемых на полином следующего вида:  $g^T L^T \text{adj}(sE - A)B$ .

Отметим, что условия или уровень априорной неопределенности обычно формулируются в постановке задачи синтеза системы адаптации. Укажем также, что очередность проведения второго и третьего этапов синтеза может осуществляться в обратном порядке. Действительно, данные этапы синтеза связаны с разрешением проблем положительности ЛСЧ и ННЧ, которые, как отмечалось выше, являются независимыми друг от друга.

Четвертый этап заключительный. На нем осуществляется проверка выполнения или достижимости поставленных целей управления, что и завершает процедуру аналитического синтеза системы адаптации.

На следующем этапе производится построение структурной схемы синтезированной системы. Для того, чтобы построить схему нужно перевести полученное математическое описание в пространство состояний. Для этого, в свою очередь, используется несколько приемов:

– прямое программирование. Этот вид программирования позволяет перейти в пространство состояний без каких-либо предварительных условий.

– последовательное программирование. Для применения этого метода необходимо, чтобы передаточная функция была представлена в виде произведения дробно-рациональных функций. То есть, чтобы как полюса (корни знаменателя), так и нули (корни числителя) были рациональны и вещественны

– параллельное программирование. Для применения этого метода необходимо, чтобы полюса передаточной функции были бы вещественными и рациональными, т.е. допускалось представление передаточной функции в виде произведения дробно-рациональных функций.

– специальное программирование. Применяется в случаях, когда выходная переменная  $y$  совпадает с переменной состояния  $x_1$ .

В результате применения каждого из этих приемов можно построить модель системы в пространстве состояний

В робастных системах, как и в адаптивных, имеется несколько видов структур, наиболее типичными из которых являются системы с последовательной эталонной моделью (рисунок 3), в которой эталонная модель подключается в схему последовательно, с параллельной ЭМ (рисунок 4), когда ЭМ подключается параллельно, и система с последовательно-параллельной ЭМ (рисунок 5), где ЭМ разделена на последовательную и параллельную часть.

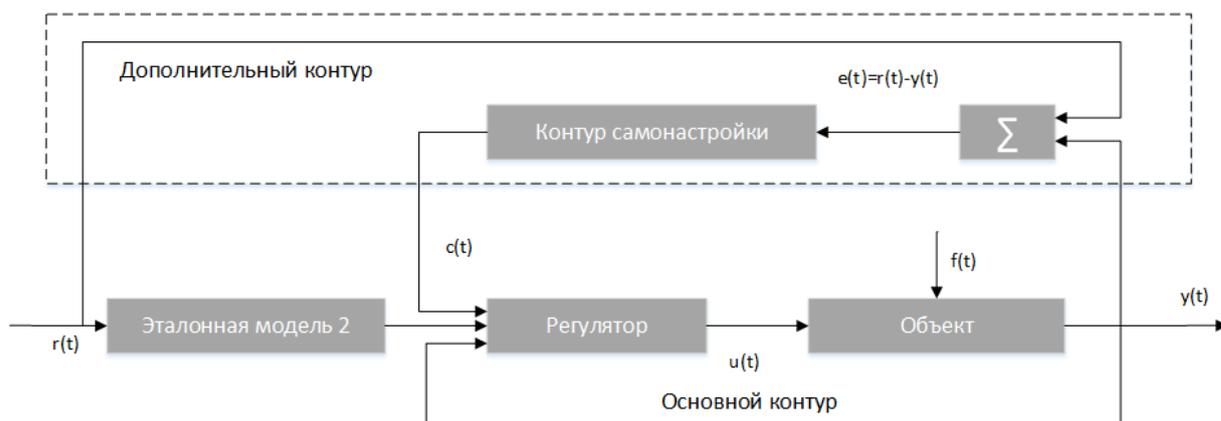


Рисунок 3 – Структура системы с последовательной эталонной моделью

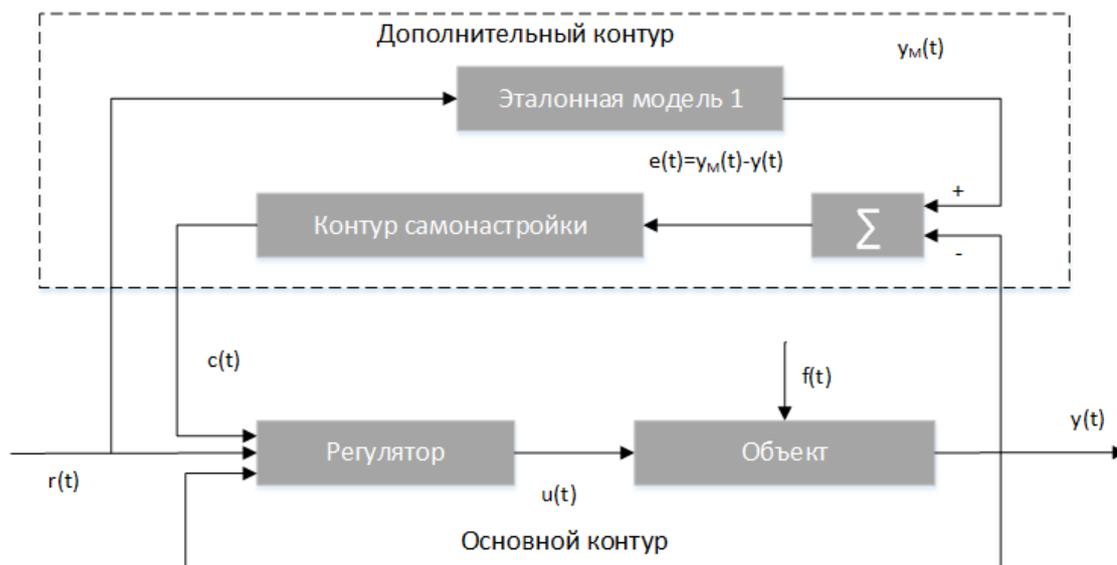


Рисунок 4 – Структура системы с параллельной эталонной моделью

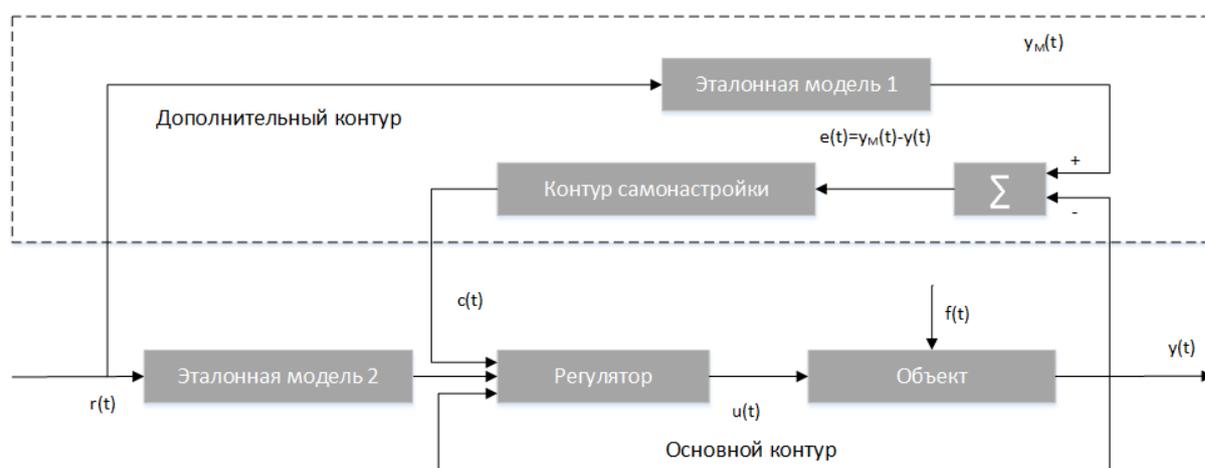


Рисунок 5 – Структура системы с последовательно-параллельной эталонной моделью

## 2.4 Наблюдатель полного порядка

Для большинства реальных систем характерно неполное измерение вектора состояния объекта управления, что делает невозможным процесс управления. В этом случае появляется задача восстановления вектора  $x(t)$  с использованием результатов измерения векторов управления и выхода  $u(t)$  и  $y(t)$ . Решение такой задачи приводит к построению структурной схемы устройства, называющегося наблюдателем. Среди наблюдателей выделяют наблюдатели полного и пониженного порядков.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Синтез наблюдателя проводится с использованием понятия ошибки наблюдения. Так для уравнений системы:

$$\frac{dx}{dt} = Nx + Bu, \quad y = C^T x, \quad (27)$$

и для наблюдателя, описанного уравнением

$$\frac{dz}{dt} = F \cdot z + H \cdot u + D \cdot y, \quad (28)$$

используя ошибку наблюдения, равную  $\hat{e} = x - z$ , и уравнение выхода  $y = C^T x$  вычтем из уравнения системы уравнение наблюдателя и получим

$$\frac{d\hat{e}}{dt} = (N - DC^T)x - Fz + (B - H) \cdot u \quad (29)$$

Выберем матрицу  $H$  исходя из соотношения  $H = B$ , тогда, если пара  $(A, C^T)$  полностью наблюдаема, то всегда найдется матрица  $D$ , что для произвольно выбранной матрицы  $F$  и любой матрицы  $A$  будет обеспечено выполнение условия  $F = N - DC^T$ .

Таким образом, имея  $F = N - DC^T$  и  $H = B$  можно преобразовать уравнение (28) к виду:

$$\frac{d\hat{e}}{dt} = (N - DC^T)\hat{e} = F \cdot \hat{e} \quad (30)$$

Откуда очевидно, что хоть и матрица  $F$  и произвольная, но она обязательно должна быть гурвицевой, так как только при выполнении этого условия имеет место следующее предельное соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}(t) = 0. \quad (31)$$

Тогда уравнение наблюдателя принимает вид

$$\frac{dz}{dt} = F \cdot z + H \cdot y(t) + B \cdot r(t) = (N - DC^T) \cdot z + D \cdot y + B \cdot u, \quad (32)$$

где  $z(t) \in R$  – вектор переменных состояния наблюдателя,

$F$  – произвольная матрица, гурвицева,

$D$  - матрица коэффициентов наблюдателя, где значения элементов матрицы  $A$  вычисляются из условия равенства соответствующих коэффициентов полиномов  $\det(sE - N)$  и  $\det(sE - N + DC^T)$ .

В работе [10] показано, что обычно собственные значения матрицы  $(N - DC^T)$  задают так, чтобы желаемые корни ее характеристического полинома  $\det(sE - N + DC^T)$  выбирались из условия

$$\min_j \operatorname{Re}(-p_j) \geq \Theta \max_i \operatorname{Re}(-p_i), \Theta \geq 3, \quad (33)$$

где  $p_j, P_i$  соответственно характеристические числа матриц  $N$  и  $(N - DC^T)$ .

Данный наблюдатель называется фильтром или наблюдателем Люэнбергера. Как видно из математического описания, подавая на входы наблюдателя выход объекта и управляющее воздействие, можно получить оценку вектора состояний объекта, которая будет максимально близкой к вектору состояний объекта, но в отличие от него будет доступна прямому измерению и может быть использована для управления объектом.

На рисунке 6 представлена структурная схема наблюдателя.

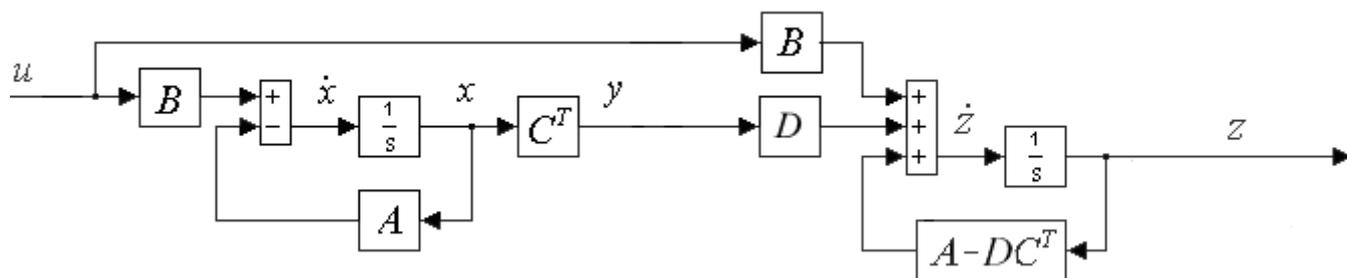


Рисунок 6 – Структурная схема наблюдателя.

## 2.5 Фильтр-корректор

Поскольку относительный порядок объекта идентификации равен  $n$  и его переменные состояния непосредственному измерению недоступны, то для решения задачи управления объектом необходимо принять специальные меры, в частности для получения оценок переменных состояния объекта управления воспользуемся фильтр-корректором [11 – 13], который расположим на выходе объекта идентификации:

$$\begin{aligned} \frac{dx_f}{dt} &= \Phi \cdot x_f + B_f \cdot y(t), z \\ (t) &= g^T x_f(t), \\ x_f(0) &= 0, \end{aligned} \quad (34)$$

где  $x_f(t) \in R^{n-1}$  – переменные состояния фильтр-корректора;

$z(t) \in R$  – выход.

Передаточная функция имеет вид:

$$W_f(s) = \frac{\delta(s)}{(Ts + 1)^{n-1}} v(s), \quad (35)$$

где  $\delta(s)$  – гурвицев полином;  $\delta(s) = \delta_n s^{n-1} + \delta_{n-1} s^{n-2} + \dots + \delta_2 s + \delta_1, \delta_1 = 1$ ;

$T$  – малая постоянная времени, значение которой выбирается из специальных условий [11–13].

Также стоит отметить, для обеспечения требований критерия гиперустойчивости коэффициенты полинома  $\delta(s)$  выбраны таким образом, чтобы его корни совпадали с  $(n-1)$  корнями характеристического уравнения ОИ.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		34

### 3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

#### 3.1 Понятие об адаптивной параметрической идентификации

Рассмотрим объект, динамика которого описывается уравнением:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t), y(t) = L^T x(t); \quad (36)$$

функционирующий в условиях априорной неопределенности

$$A = A(\xi(\xi)) = B(\xi(\xi)) = L(\xi(\xi)) \in \Xi. \quad (37)$$

Для объекта (20), с помощью регулятора обратных связей вида

$$u(t) = K(t), \quad (38)$$

где  $K$  – матрица постоянных коэффициентов;

требуется обеспечить заданную динамику, т.е. выбрать матрицу  $K$  так, чтобы матрица  $(A + BKL^T)$  была бы равна заданной или желаемой матрице  $A_M$ .

Поскольку, согласно условиям (37), параметры объекта (36), априорно неизвестны, то достаточно очевидно, что поставленную задачу можно решить лишь тогда, когда до замыкания объекта (36) регулятором (38), т.е. предварительно, удалось определить (идентифицировать) матрицы  $A$ ,  $B$ , и  $L$ .

Для идентификации матриц  $A$ ,  $B$ , и  $L$  будет использован метод настраиваемой модели.

#### 3.2 Постановка задачи параметрической идентификации с измеряемыми переменными состояниями

Рассматривается объект идентификации (ОИ), динамика которого описывается уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot r(t),$$

$$y(t) = x(t),$$
(39)

где  $x(t) \in R$  – вектор переменных состояния ОИ;

$r(t)$  – сигнал идентификации;

$y(t) \in R$  – выходной сигнал ОИ;

$A$  – гурвицева, матрица состояний ОИ;

$B^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]$  – вектор управления, функционирует в условиях априорной неопределенности вида:

$$A = A(\xi), B = B(\xi),$$
(40)

где  $\xi$  – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству  $\Xi$ .  
 Причем структура матрицы  $A$  и вектора  $B$  известна и может быть представлена в виде:

$$A = (A_{НП} + B_0 \cdot C_0^T), \quad B = B_0 \cdot K_0,$$
(41)

где  $K_0$  и  $C_0$  – неизвестная скалярная величина и вектор,

$A_{НП}$  – нильпотентная матрица.

И имеет вид:

$$B_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad A_{НП} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$
(42)

Настраиваемая модель, описывается уравнениями

$$\frac{dx_H(t)}{dt} = N(x_H(t) - x(t)) + A_H(t)x(t) + B_H(t)r(t),$$

$$y_H(t) = x_H(t),$$
(43)

где  $N$  – матрица, гурвицева, а матрица  $A_H(t)$  и вектор  $B_H(t)$  имеют структуры, подобные (3) и заданные в виде:

$$A_H(t) = (A_{H\Pi} + B_0 \cdot C^T(t)), \quad B_H(t) = B_0 \cdot K(t),$$
(44)

На рисунок 7 представленная структурная схема системы идентификации с настраиваемой моделью.

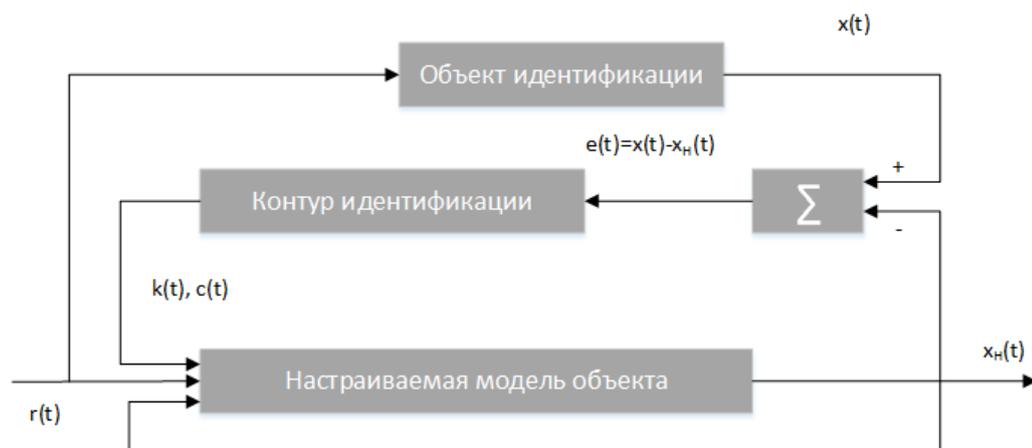


Рисунок 7 – Система идентификации с настраиваемой моделью

*Постановка задачи.* Требуется в условиях априорной неопределенности (40) определить значение элементов матрицы  $A$  и вектора  $B$  таким образом, чтобы имело место выполнение следующих предельных условий:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_H(t)) = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (A_{H\Pi} + B_0 \cdot C^T(t)) = A_{H\Pi} + B_0 \cdot C_0^T = A = const,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (B_0 \cdot K(t)) = B_0 K_0 = B = const.$$
(45)

При решении задачи адаптивной параметрической идентификации, кроме выполнения целевых условий вида (45), требуется дополнительно обеспечить богатство спектра сигнала идентификации  $r(t)$ . Как известно, последнее означает, что гармонический сигнал  $r(t)$  должен иметь не менее  $0.5(n + 1)$  различных частот, где  $n$  – размерность вектора  $x(t)$ .

### 3.3 Постановка задачи параметрической идентификации с быстродействующим наблюдателем полного порядка

Рассматривается объект идентификации (ОИ) у которого переменные состояния недоступны измерению и динамика которого описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A \cdot x(t) + B \cdot r(t), \\ y(t) &= x(t), \end{aligned} \quad (46)$$

где  $x(t) \in R$  – вектор переменных состояния ОИ;

$r(t)$  – сигнал идентификации;

$y(t) \in R$  – выходной сигнал ОИ;

$A$  – гурвицева, матрица состояний ОИ;

$B^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]$  – вектор управления, функционирует в условиях априорной неопределенности вида:

$$A = A(\xi), B = B(\xi), \quad (47)$$

где  $\xi$  – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству  $\Xi$ .

Причем структура матрицы  $A$  и вектора  $B$  известна и может быть представлена в виде:

$$A = (A_{III} + B_0 \cdot C_0^T), \quad B = B_0 \cdot K_0, \quad (48)$$

где  $K_0$  и  $C_0$  – неизвестная скалярная величина и вектор,

$A_{H\Pi}$  – нильпотентная матрица.

И имеет вид:

$$B_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad A_{H\Pi} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (49)$$

Настраиваемая модель, описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dx_H(t)}{dt} &= N(x_H(t) - x(t)) + A_H(t)x(t) + B_H(t)r(t), \\ y_H(t) &= x_H(t), \end{aligned} \quad (50)$$

где  $N$  – матрица, гурвицева, а матрица  $A_H(t)$  и вектор  $B_H(t)$  имеют структуры, подобные (3) и заданные в виде:

$$A_H(t) = (A_{H\Pi} + B_0 \cdot C^T(t)), \quad B_H(t) = B_0 \cdot K(t), \quad (51)$$

Для того, чтобы извлечь недоступные переменные состояния, на выход объекта идентификации подключим быстродействующий наблюдатель полного порядка.

Уравнение наблюдателя имеет вид:

$$\frac{dz}{dt} = F \cdot z + H \cdot y(t) + B \cdot r(t) = (N - DC^T) \cdot z + D \cdot y + B \cdot u, \quad (52)$$

где  $z(t) \in R$  – вектор переменных состояния наблюдателя,

$F$  – произвольная матрица, гурвицева,

$D$  – матрица коэффициентов наблюдателя, где значения элементов матрицы  $A$  вычисляются из условия равенства соответствующих коэффициентов полиномов  $\det(sE - N)$  и  $\det(sE - N + DC^T)$ .

В работе [10] показано, что обычно собственные значения матрицы  $(N - DC^T)$  задают так, чтобы желаемые корни ее характеристического полинома  $\det(sE - N + DC^T)$  выбирались из условия

$$\min_j \operatorname{Re}(-p_j) \geq \Theta \max_i \operatorname{Re}(-p_i), \Theta \geq 3, \quad (53)$$

где  $p_j, P_i$  соответственно характеристические числа матриц  $N$  и  $(N - DC^T)$ .

На рисунок 8 представленная структурная схема системы идентификации с наблюдателем.

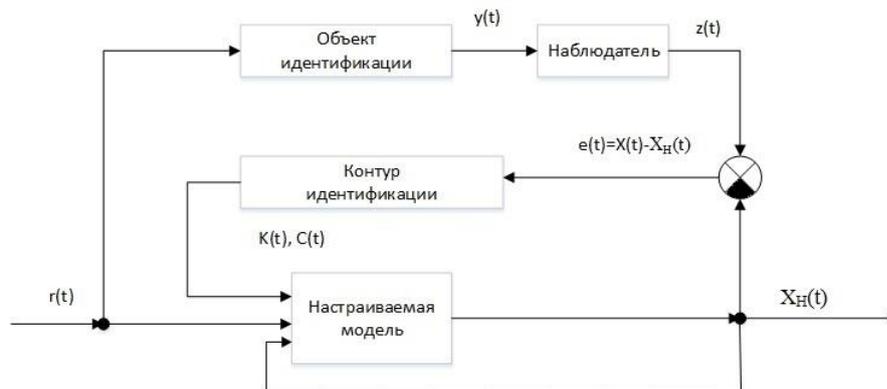


Рисунок 8 – Система идентификации с наблюдателем

*Постановка задачи.* Требуется в условиях априорной неопределенности (47) определить значение элементов матрицы  $A$  и вектора  $B$  таким образом, чтобы имело место выполнение следующих предельных условий:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (z(t) - x_H(t)) &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (A_{НП} + B_0 \cdot C^T(t)) &= A_{НП} + B_0 \cdot C_0^T = A = const, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (B_0 \cdot K(t)) &= B_0 K_0 = B = const. \end{aligned} \quad (54)$$

### 3.4 Постановка задачи параметрической идентификации с фильтр-корректором

Рассматривается объект идентификации (ОИ) у которого переменные состояния недоступны измерению и динамика которого описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A \cdot x(t) + B \cdot r(t), \\ y(t) &= x(t), \end{aligned} \quad (55)$$

где  $x(t) \in R$  – вектор переменных состояния ОИ;

$r(t)$  – сигнал идентификации;

$y(t) \in R$  – выходной сигнал ОИ;

$A$  – гурвицева, матрица состояний ОИ;

$B^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]$  – вектор управления, функционирует в условиях априорной неопределенности вида:

$$A = A(\xi), B = B(\xi) \quad (56)$$

где  $\xi$  – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству  $\Xi$ .

Причем структура матрицы  $A$  и вектора  $B$  известна и может быть представлена в виде:

$$A = (A_{НП} + B_0 \cdot C_0^T), \quad B = B_0 \cdot K_0, \quad (57)$$

где  $K_0$  и  $C_0$  – неизвестная скалярная величина и вектор,

$A_{НП}$  – нильпотентная матрица.

И имеет вид:

$$B_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad A_{HH} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (58)$$

Настраиваемая модель, описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dx_H(t)}{dt} &= N(x_H(t) - x(t)) + A_H(t)x(t) + B_H(t)r(t), \\ y_H(t) &= x_H(t), \end{aligned} \quad (59)$$

где  $N$  – матрица, гурвицева, а матрица  $A_H(t)$  и вектор  $B_H(t)$  имеют структуры, подобные (3) и заданные в виде:

$$A_H(t) = (A_{HH} + B_0 \cdot C^T(t)), \quad B_H(t) = B_0 \cdot K(t), \quad (60)$$

Динамика фильтр-корректора описывается уравнениями вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_f}{dt} &= \Phi \cdot x_f + B_f \cdot y(t), \\ z(t) &= g^T x_f(t), \\ x_f(0) &= 0, \end{aligned} \quad (61)$$

где  $x_f(t) \in R^{n-1}$  – переменные состояния фильтр-корректора.

$z(t) \in R$  – выход.

Фильтр-корректор подключается последовательно к выходу объекта идентификации и тем самым извлекает недоступные измерению переменные состояния.

На рисунок 9 представлена структурная схема системы идентификации с фильтр-корректором.

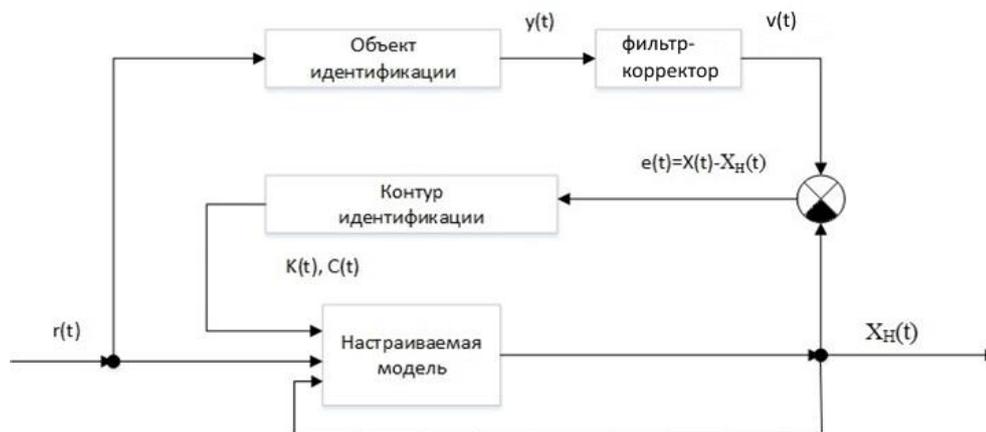


Рисунок 9 – Система идентификации с фильтр-корректором.

*Постановка задачи.* Требуется в условиях априорной неопределенности (56) определить значение элементов матрицы  $A$  и вектора  $B$  таким образом, чтобы имело место выполнение следующих предельных условий:

$$\begin{aligned}
 \lim_{t \rightarrow \infty} (x_f(t) - x_H(t)) &= 0, \\
 \lim_{t \rightarrow \infty} (A_{НП} + B_0 \cdot C^T(t)) &= A_{НП} + B_0 \cdot C_0^T = A = const, \\
 \lim_{t \rightarrow \infty} (B_0 \cdot K(t)) &= B_0 K_0 = B = const.
 \end{aligned} \tag{62}$$

## 4 СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Синтез системы адаптации с параметрической идентификацией опирается на использования критерия гиперустойчивости [4].

### 4.1 Синтез алгоритмов параметрической идентификации с измеряемыми переменными состояниями

На первом этапе рассчитаем относительно ошибки рассогласования  $e(t) = x(t) - x_H(t)$  для системы (39), (41), (43), (44) можно записать эквивалентное математическое описание, проведя следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} &= \frac{dx}{dt} - \frac{dx_H}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot r(t) + N \cdot (x(t) - x_H(t)) - A_H \cdot x(t) - B_H \cdot r(t) = \\ &= N \cdot e + (A - A_H) \cdot x(t) + (B - B_H) \cdot r(t) = N \cdot e + (B_0 \cdot C_0^T - B_0 \cdot C^T(t)) \cdot x(t) + \\ &+ (B_0 \cdot K_0 - B_0 \cdot K(t)) \cdot r(t) = N \cdot e - B_0 [(C(t) - C_0)^T \cdot x(t) + (K(t) - K_0) \cdot r(t)]. \end{aligned} \quad (63)$$

После проведенных преобразований, эквивалентное математическое описание примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= N \cdot e(t) + B_0 \cdot \mu(t), v(t) = g^T \cdot e(t), \\ \mu(t) &= -[(C(t) - C_0)^T \cdot x(t) + (K(t) - K_0) \cdot r(t)] \end{aligned} \quad (64)$$

На втором этапе обеспечим разрешимость ИНП. Для этого запишем интеграл для нелинейной части системы (64):

$$\eta(0, t) = - \int_0^t \mu(s) \cdot v(s) ds = \int_0^t [(C(s) - C_0)^T \cdot z(s) + (K(s) - K_0) \cdot r(s)] \cdot v(s) \cdot ds, \quad (65)$$

и определим самонастройки вектора  $C(t)$  и скалярной величины  $K(t)$  синтезировать следующим алгоритмам

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

$$\begin{aligned}\frac{dC(t)}{dt} &= H_i \cdot z(t) \cdot g^T \cdot e(t), \\ \frac{dK(t)}{dt} &= h_i \cdot r(t) \cdot g^T \cdot e(t), \\ h &= \text{const} > 0, H_i = \text{const} > 0, i = \overline{1 \dots n},\end{aligned}\tag{66}$$

то для интеграла (65) будет справедлива оценка

$$\begin{aligned}\eta(0,t) &= h^{-1} \int_0^t (K(s) - K_0) \frac{dK(s)}{ds} ds + \int_0^t (C(s) - C_0)^T H^{-1} \frac{dC^T(s)}{ds} ds = \\ &= \frac{1}{2} h^{-1} \cdot [(K(t) - K_0)^2 - (K(0) - K_0)^2] + \\ &+ \frac{1}{2} [(C(t) - C_0)^T H^{-1} (C(t) - C_0) - (C(0) - C_0)^T H^{-1} (C(0) - C_0)] \geq \\ &\geq -\frac{1}{2} h^{-1} (K(0) - K_0)^2 - \frac{1}{2} (C(0) - C_0)^T H^{-1} (C(0) - C_0) = \\ &= -h_0 = \text{const} < 0, \forall t > 0,\end{aligned}\tag{67}$$

эквивалентная выполнению требований ИНП.

На третьем этапе синтеза решается проблема вещественности и строгой положительности передаточной функции ЛСЧ системы (64), имеющая в данном случае вид:

$$W(s) = g^T (sE - N)^{-1} B_0 = \frac{g^T \text{adj}(sE - N) B_0}{\det(sE - N)},\tag{68}$$

для которой выполняется частное условие:

$$\text{Re} [g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0] > 0, \forall \omega > 0,\tag{69}$$

достаточно за счет выбора значений вектора  $g$ , расположить корни полинома

$$g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0 \quad (70)$$

число которых  $(n-1)$ , в порядке их последовательного чередования с  $n$  корнями полинома  $\det(sE - N)$ .

На четвертом этапе, так как выполнено ИНП и передаточная функция ЛСЧ вещественна и строго положительна, то следует что система (64) является асимптотически гиперустойчивой. Также, учитывая вид алгоритмов самонастройки, будут выполнены целевые условия (45).

#### 4.2 Синтез алгоритмов параметрической идентификации с быстродействующим наблюдателем полного порядка

Так как, вектор переменных состояний ОИ (46) недоступен измерению, то воспользуемся моделью быстродействующего наблюдателя полного порядка (52). Вектор его переменных состояний  $z(t)$  совпадает с вектором переменных состояний объекта идентификации  $x(t)$  и доступен для измерения.

На первом этапе эквивалентное математическое описание запишем, используя оценки, полученные с выхода наблюдателя (52), в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{e}(t)}{dt} &= N \cdot \hat{e}(t) + B_0 \cdot \hat{\mu}(t), \\ \hat{v}(t) &= g^T \cdot \hat{e}(t), \\ \hat{\mu}(t) &= -[(C(t) - C_0)^T \cdot z(t) + (K(t) - K_0) \cdot r(t)] \end{aligned} \quad (71)$$

На втором этапе обеспечим разрешимость ИНП. Для этого запишем интеграл для нелинейной части системы (71):

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \hat{\mu}(s) \cdot \hat{v}(s) ds = \int_0^t [(C(s) - C_0)^T \cdot z(s) + (K(s) - K_0) \cdot r(s)] \cdot \hat{v}(s) \cdot ds, \quad (72)$$

и определим самонастройки вектора  $C(t)$  и скалярной величины  $K(t)$  синтезировать следующим алгоритмам

$$\begin{aligned} \frac{dC(t)}{dt} &= H_i \cdot z(t) \cdot g^T \cdot \hat{e}(t), \\ \frac{dK(t)}{dt} &= h_i \cdot r(t) \cdot g^T \cdot \hat{e}(t), \\ h &= const > 0, H_i = const > 0, i = \overline{1 \dots n}, \end{aligned} \quad (73)$$

то для интеграла (72) будет справедлива оценка

$$\begin{aligned} \eta(0,t) &= h^{-1} \int_0^t (K(s) - K_0) \frac{dK(s)}{ds} ds + \int_0^t (C(s) - C_0)^T H^{-1} \frac{dC^T(s)}{ds} ds = \\ &= \frac{1}{2} h^{-1} \cdot [(K(t) - K_0)^2 - (K(0) - K_0)^2] + \\ &+ \frac{1}{2} [(C(t) - C_0)^T H^{-1} (C(t) - C_0) - (C(0) - C_0)^T H^{-1} (C(0) - C_0)] \geq \\ &\geq -\frac{1}{2} h^{-1} (K(0) - K_0)^2 - \frac{1}{2} (C(0) - C_0)^T H^{-1} (C(0) - C_0) = \\ &= -h_0 = const < 0, \forall t > 0, \end{aligned} \quad (74)$$

Таким образом, было показано выполнение требований ИНП и осуществлено определение явного вида алгоритмов самонастройки.

На третьем этапе синтеза решается проблема вещественности и строгой положительности передаточной функции ЛСЧ системы (71), имеющая в данном случае вид:

$$W(s) = g^T (sE - N)^{-1} B_0 = \frac{g^T \text{adj}(sE - N) B_0}{\det(sE - N)}. \quad (75)$$

Для которой выполняется частное условие:

$$\operatorname{Re} [g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0] > 0, \forall \omega > 0, \quad (76)$$

достаточно за счет выбора значений вектора  $g$ , расположить корни полинома

$$g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0 \quad (77)$$

число которых  $(n-1)$ , в порядке их последовательного чередования с  $n$  корнями полинома  $\det (sE - N)$ .

На четвертом этапе, так как выполнено ИНП и передаточная функция ЛСЧ вещественна и строго положительна, то следует что система (71) является асимптотически гиперустойчивой. Также, учитывая вид алгоритмов самонастройки, будут выполнены целевые условия (54).

#### **4.3 Синтез алгоритмов параметрической идентификации с применением фильтр-корректора**

Как уже отмечалось выше, вектор переменных состояний объекта идентификации (55) не доступен измерению. Поэтому в данном случае используется фильтр-корректор (61).

Для работоспособности системы адаптивной параметрической идентификации, опираясь на метод гиперустойчивости, подключим на выход объекта идентификации фильтр-корректор.

Передаточная функция объекта идентификации имеет вид:

$$W_{on}(s) = g^T (s)(sE - N)^{-1} B_0 = \frac{1}{\alpha(s)}, \quad (78)$$

где  $\alpha(s)$  – гурвицев полином.

Следуя работе [11], в силу последовательного соединения ОУ и ФК их общую передаточную функцию можно представить следующим образом:

$$\frac{1}{\alpha(s)} \cdot \frac{\delta(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{\alpha(s)} \cdot 1, \quad (79)$$

где  $\delta(s) = \gamma(s)$  – гурвицев, позволяет ввести в рассмотрение следующие математические модели:

видоизменённого объекта идентификации

$$\frac{dx_f(t)}{dt} = A \cdot x_f(t) + B \cdot u(t), \quad (80)$$

$$\tilde{y}(t) = g^T \cdot x_f(t),$$

$$W_{OY} = \frac{1}{\alpha(s)}, \quad (81)$$

видоизменённого фильтр-корректора

$$\frac{dx_f}{dt} = A_f x_f + B_0 \tilde{y}(t), \quad (82)$$

$$z(t) = x_f(t),$$

$$W_f = \frac{1}{\gamma(s)} v(s) = \frac{1}{(T^* s + 1)^{n-1}} v(s), \quad (83)$$

где  $T^* > 0$  – малая постоянная времени.

Как показано в работе [11] исходная система (55) эквивалентна видоизменённой системе (80).

В работах [11–14] доказано, что видоизменённая система (80) является L-диссипативной, если параметр фильтр-корректора (82), (83) определяется меньшим значением, вычисленным из соотношений

$$T_1 \leq \frac{0.93}{(n-2)a_{m1}};$$

$$T_2 \leq \frac{0.465 \cdot a_{m1}}{(n-1)a_{m2}}.$$
(84)

Считая [11–15], что видоизменённый корректор (82) описывает структурное возмущение и исключая его из основного контура системы, будем рассматривать упрощенную систему управления

$$\frac{dx_f(t)}{dt} = A \cdot x_f(t) + B \cdot u(t),$$

$$\tilde{y}(t) = g^T \cdot x_f(t),$$

$$u(t) = K(t) r(t) + C^T(t) y(t).$$
(85)

На первом этапе относительно ошибки рассогласования  $\tilde{e}(t) = x_f(t) - x_H(t)$  для системы (80), (82) можно записать эквивалентное математическое описание, проведя следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{e}}{dt} &= \frac{dx_f}{dt} - \frac{dx_H}{dt} = A \cdot x_f(t) + B \cdot r(t) + N \cdot (x_f(t) - x_H(t)) - A_H \cdot x_f(t) - B_H \cdot r(t) = \\ &= N \cdot \tilde{e} + (A - A_H) \cdot x_f(t) + (B - B_H) \cdot r(t) = N \cdot \tilde{e} + (B_0 \cdot C_0^T - B_0 C^T(t)) \cdot x_f(t) + \\ &+ (B_0 \cdot K_0 - B_0 \cdot K(t)) \cdot r(t) = N \cdot \tilde{e} - B_0 [(C(t) - C_0)^T \cdot x_f(t) + (K(t) - K_0) \cdot r(t)]. \end{aligned}$$
(86)

После проведенных преобразований, эквивалентное математическое описание примет вид:

$$\frac{d\tilde{e}(t)}{dt} = N \cdot \tilde{e}(t) + B_0 \cdot \mu(t),$$

$$v(t) = g^T \cdot \tilde{e}(t).$$
(87)

На втором этапе обеспечим разрешимость ИНП. Для этого запишем интеграл для нелинейной части системы (87):

$$\eta(0,t) = -\int_0^t \mu(s) \cdot v(s) ds = \int_0^t [(C(s) - C_0)^T \cdot z(s) + (K(s) - K_0) \cdot r(s)] \cdot v(s) \cdot ds, \quad (88)$$

и определим самонастройки вектора  $C(t)$  и скалярной величины  $K(t)$  синтезировать следующим алгоритмам

$$\begin{aligned} \frac{dC(t)}{dt} &= H_i \cdot \tilde{y}(t) \cdot g^T \cdot \tilde{e}(t), \\ \frac{dK(t)}{dt} &= h_i \cdot r(t) \cdot g^T \cdot \tilde{e}(t), \\ h &= \text{const} > 0, H_i = \text{const} > 0, i = \overline{1 \dots n}, \end{aligned} \quad (89)$$

то для интеграла (88) будет справедлива оценка

$$\begin{aligned} \eta(0,t) &= h^{-1} \int_0^t (K(s) - K_0) \frac{dK(s)}{ds} ds + \int_0^t (C(s) - C_0)^T H^{-1} \frac{dC^T(s)}{ds} ds = \\ &= \frac{1}{2} h^{-1} \cdot [(K(t) - K_0)^2 - (K(0) - K_0)^2] + \\ &+ \frac{1}{2} [(C(t) - C_0)^T H^{-1} (C(t) - C_0) - (C(0) - C_0)^T H^{-1} (C(0) - C_0)] \geq \\ &\geq -\frac{1}{2} h^{-1} (K(0) - K_0)^2 - \frac{1}{2} (C(0) - C_0)^T H^{-1} (C(0) - C_0) = \\ &= -h_0 = \text{const} < 0, \forall t > 0, \end{aligned} \quad (90)$$

эквивалентная выполнению требований ИНП.

На третьем этапе синтеза решается проблема вещественности и строгой положительности передаточной функции ЛСЧ системы (87), имеющая в данном случае вид:

$$W(s) = g^T (sE - N)^{-1} B_0 = \frac{g^T \text{adj}(sE - N) B_0}{\det(sE - N)} \quad (91)$$

Для которой выполняется частное условие:

$$\text{Re} [g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0] > 0, \forall \omega > 0, \quad (92)$$

достаточно за счет выбора значений вектора  $g$ , расположить корни полинома

$$g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0, \quad (93)$$

число которых  $(n-1)$ , в порядке их последовательного чередования с  $n$  корнями полинома  $\det(sE - N)$ .

На четвертом этапе, так как выполнено ИНП и передаточная функция ЛСЧ вещественна и строго положительна, то следует что система (87) является асимптотически гиперустойчивой. Также, учитывая вид алгоритмов самонастройки, будут выполнены целевые условия (62).

## 5 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB

Имитационное моделирование в процессе разработки систем адаптивного управления занимает важное место, поскольку позволяет оценить качество функционирования синтезированной системы управления и определить значения параметров синтезированного закона регулирования.

Имитационное моделирование проводилось в среде математического пакета MATLAB. Для визуального моделирования применялась сопутствующая программа MATLAB Simulink.

### 5.1 Описание MATLAB

Matlab – специализированный математический пакет, предназначенный для технических расчетов. Он позволяет выражать решение задач в форме, наиболее близкой к математической. Среда Matlab позволяет использовать гибкий язык для программирования и создания приложений, а так же предоставляет удобные средства для визуализации. К областям применения Matlab относятся математические вычисления, создание алгоритмов, моделирование, анализ данных, исследование и визуализация, научная и инженерная графика, разработка приложений, включая создание графического интерфейса.

Matlab – это интерактивная система, в которой основным элементов данных является массив. Это позволяет решать различные задачи, связанные с техническими вычислениями, особенно в которых используются матрица и вектора, в несколько раз быстрее, чем при написании программ с использованием «скалярных» языков программирования, таких как Си и Фортран.

Matlab постоянно развивается, ориентируясь на любые категории пользователей – от студентов до специализированных научных центров. При этом данный пакет программ удовлетворяет в полной мере потребности и тех и других позволяя проводить различного рода исследования и анализы прикладных проблем.

Основная роль в пакете Matlab отводится специализированным группам программ, называемых toolbox. Данные программы сгруппированы по принципу сходных решаемых задач. Каждый toolbox – это набор М-файлов призванных

обеспечить решение какой – либо из прикладных задач. Например моделирование нейросетей, обработки данных нечеткой логики, сигналов и т.д.

Matlab 6.5 был выбран в качестве среды разработки поскольку эта версия программы является наиболее надежной и продуктивной с точки зрения производительности. Данный программный продукт позволяет максимально продуктивно использовать ресурсы ЭВМ, а так же оборудован новыми средствами визуализации и графическим интерфейсом пользователя (GUI).

Система Matlab состоит из пяти основных частей:

- 1) язык Matlab;
- 2) среда Matlab;
- 3) управляемая графика;
- 4) библиотека математических функций;
- 5) программный интерфейс.

Язык Matlab – это язык матриц и массивов высокого уровня с управлением потоками, функциями, структурами данных, вводом-выводом и особенностями объектно-ориентированного программирования. Это позволяет как программировать в «небольшом масштабе» для быстрого создания черновых программ, так и в «большом» для создания больших и сложны приложений;

Среда Matlab – это набор инструментов и приспособлений, с которыми работает пользователь или программист Matlab. Она включает в себя средства управления переменными в рабочем пространстве Matlab, вводом и выводом данных, а также создания, контроля и отладки М-файлов и приложений Matlab;

Графическая система Matlab, которая включает в себя команды высокого уровня для визуализации двух- и трехмерных данных, обработки изображений, анимации, иллюстрированной графики. Она также включает в себя команды низкого уровня, позволяющие полностью редактировать внешний вид графики, так же как при создании графического пользовательского интерфейса для Matlab приложений;

Библиотека математических функций – это обширная коллекция вычислительных алгоритмов от элементарных функций, таких как сумма, синус, косинус,

комплексная арифметика, до более сложных, таких как обращение матрица, нахождение собственных чисел, функций Бесселя, быстрое преобразование Фурье;

Программный интерфейс – это библиотека, которая позволяет писать программы на Си и Фортране, которые взаимодействуют с Matlab. Она включает средства для вызова программ из Matlab (динамическая связь), вызывая Matlab как вычислительный инструмент для чтения-записи М-файлов.

## **5.2 Среда визуального проектирования Simulink**

Simulink, сопутствующая Matlab программа, – это интерактивная система для моделирования нелинейных динамических систем. Она представляет собой среду, управляемую мышью, которая позволяет моделировать процесс путем перетаскивания блоков диаграмм на экране и их манипуляцией. Simulink работает с линейными, нелинейными, непрерывными, дискретными, многомерными системами.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.

Интерактивная среда Simulink, позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени.

Дополнительные пакеты расширения Simulink позволяют решать весь спектр задач от разработки концепции модели до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации. Simulink интегрирован в среду MATLAB, что позволяет использовать встроенные математические алгоритмы, мощные средства обработки данных и научную графику.

Simulink Library Browser (средство просмотра Библиотеки Simulink) содержит в себе библиотеку блоков наиболее часто используемых для моделирования

систем.

В эту библиотеку входят:

- блоки непрерывной и дискретной динамики, такие как Integrator (Интегратор) и Unit Delay (Звено Задержки);
- алгоритмические блоки, такие как Sum (Сумматор), Product (Произведение), Lookup Table (Справочная Таблица);
- структурные блоки, такие как Mux (Мультиплексор), Switch (Переключатель), Bus Selector (Селектор Шины).

Можно выполнять симуляцию динамических свойств системы и просматривать результаты, как только симуляция началась. Чтобы гарантировать заданную скорость симуляции и точность, Simulink предоставляет ODE решатели с фиксированным и переменным шагом, графический отладчик и подпрограмму оценки времени выполнения отдельных функций модели.

Решатели – это числовые алгоритмы интегрирования, которые вычисляют динамику системы в течение определенного промежутка времени, используя информацию, содержащуюся в модели.

Simulink предоставляет решатели для симуляции широкого диапазона типов систем, включая системы непрерывного времени (аналоговые), дискретного времени (цифровые), гибридные (смешанный сигнал) и системы с различными периодами дискретизации любого размера.

При помощи решателей в Simulink можно выполнять симуляцию жёстких систем и систем с разрывами. Можно задавать опции симуляции, включая тип и свойства решателя, время начала и конца симуляции и выполнять загрузку или сохранение данных симуляции. Можно также настраивать оптимизационную и диагностическую информацию. Вместе с моделью можно сохранять разные опциональные комбинации.

Ключевые особенности:

- интерактивная графическая среда для построения блок-диаграмм;
- расширяемая библиотека готовых блоков;
- удобные средства построения многоуровневых иерархических много-

компонентных моделей;

– средство навигации и настройки параметров сложных моделей - Model Explorer;

– средства интеграции готовых C/C++, FORTRAN, ADA и MATLAB-алгоритмов в модель, взаимодействие с внешними программами для моделирования;

– современные средства решения дифференциальных уравнений для непрерывных, дискретных, линейных и нелинейных объектов (в т.ч. с гистерезисом и разрывами);

– имитационное моделирование нестационарных систем с помощью решателей с переменным и постоянным шагом или методом управляемого из MATLAB пакетного моделирования;

– удобная интерактивная визуализация выходных сигналов, средства настройки и задания входных воздействий;

– средства отладки и анализа моделей;

– полная интеграция с MATLAB, включая численные методы, визуализацию, анализ данных и графические интерфейсы. [27]

### **5.1 Имитационное моделирование системы с измеряемыми переменными состояниями**

Для иллюстрации работы адаптивной системы с параметрической идентификацией (39), (41), (42), (43) приведем числовые значения:

настраиваемая модель:

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -24 & -26 & -9 \end{pmatrix},$$

$$g^T = (1 \quad 6 \quad 8.75);$$

объект идентификации:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -7 & -10 & -6 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix},$$

$$C^T = (1 \ 0 \ 0)$$

сигнал идентификации:

$$r(t) = 4 \cdot (\sin(t) - 2 \cdot \sin(3 \cdot t)).$$

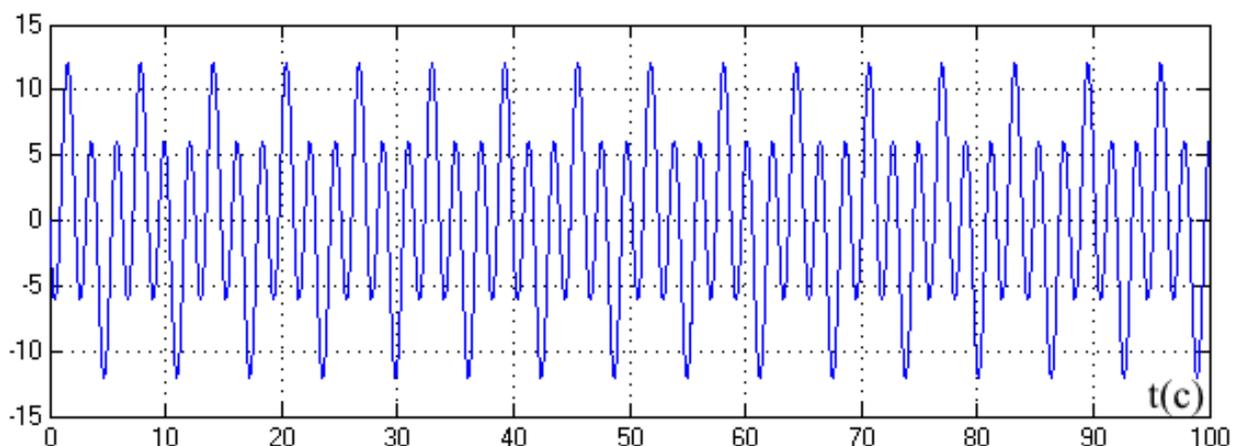


Рисунок 10 – График сигнала идентификации

Так как переменные состояния объекта идентификации доступны измерению, то не применяем дополнительных мер.

Как видно из полученных результатов (см. рисунок 11), система адаптивной параметрической идентификации имеет хорошую динамику и высокую точность настройки.

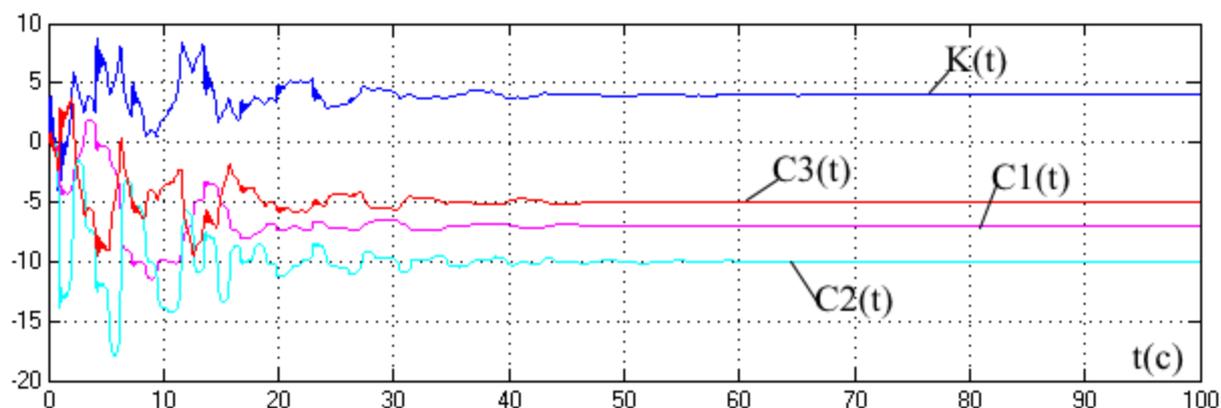


Рисунок 11 – Динамика настройки параметров системы (39), (41), (42), (43)

Рассогласование объекта идентификации и настраиваемой модели (см. рисунок 12) меньше 1%. Что свидетельствует о том, что система работает качественно и имеет высокую точность. Следовательно, идентификация проходит успешно.

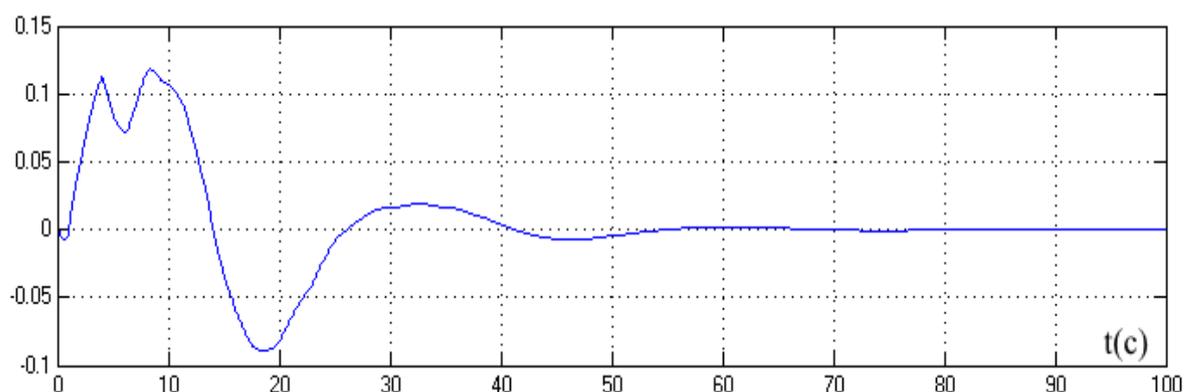


Рисунок 12 – Рассогласование выходов ОИ (39) и настраиваемой модели(42)

Simulink схема системы представлена в приложении В.

## 5.2 Имитационное моделирование системы с наблюдателем.

Для иллюстрации и оценки качества адаптивной системы с параметрической идентификацией с наблюдателем (46), (48), (52), приведем числовые значения:

Настраиваемая модель:

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -24 & -26 & -9 \end{pmatrix},$$

$$g^T = (1 \quad 6 \quad 8.75);$$

объект идентификации:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -5 & -15 & -10 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix},$$

$$C^T = (1 \quad 0 \quad 0)$$

сигнал идентификации:

$$r(t) = 4 \cdot (\sin(t) - 2 \cdot \sin(3 \cdot t)).$$

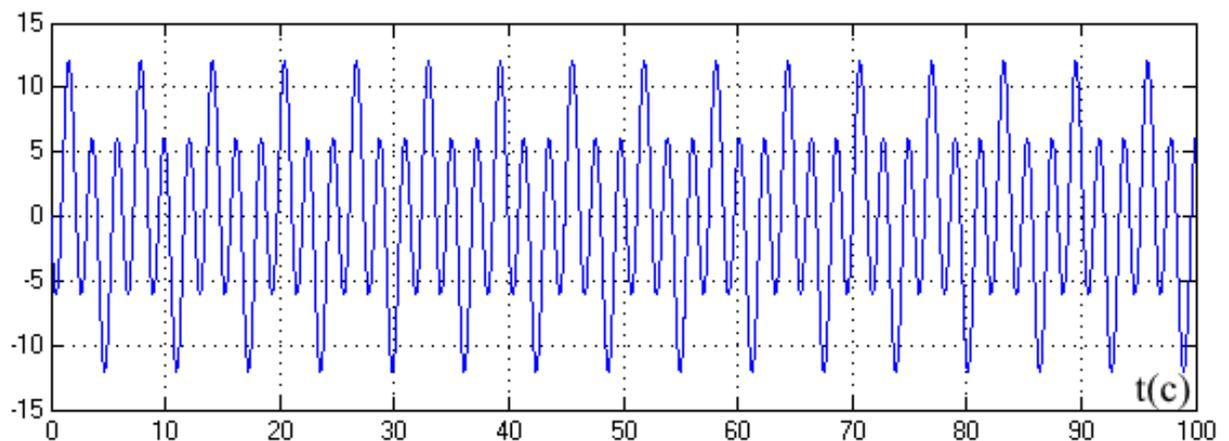


Рисунок 13 – График сигнала идентификации

Для обеспечения быстродействия наблюдателя при расчете матрицы  $D$  использовались собственные значения матрицы  $A_m$  больше собственных значений

эталонной модели в 30000 раз.

Расчет наблюдателя производится автоматически с использованием макроязыка MATLAB. (см. приложение В)

Наблюдатель (см. рисунок 15) сформируем с учетом параметров настраиваемой модели, а вектор  $D$  рассчитаем исходя из условий (21) и зададим в виде:

$$D^T = (224991 \quad 16872975055 \quad 421723137374715)$$

Параметры адаптивного регулятора (см. рисунок 14) с алгоритмами самонастройки выбраны следующим образом:  $H_1 = 15, H_2 = 30, H_3 = 30, h = 5$ .

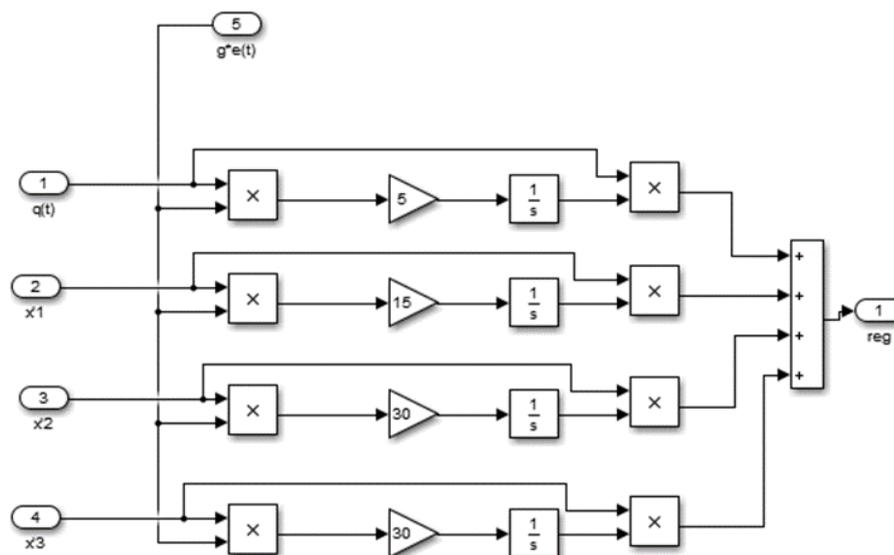


Рисунок 14 – Структурная схема адаптивного регулятора

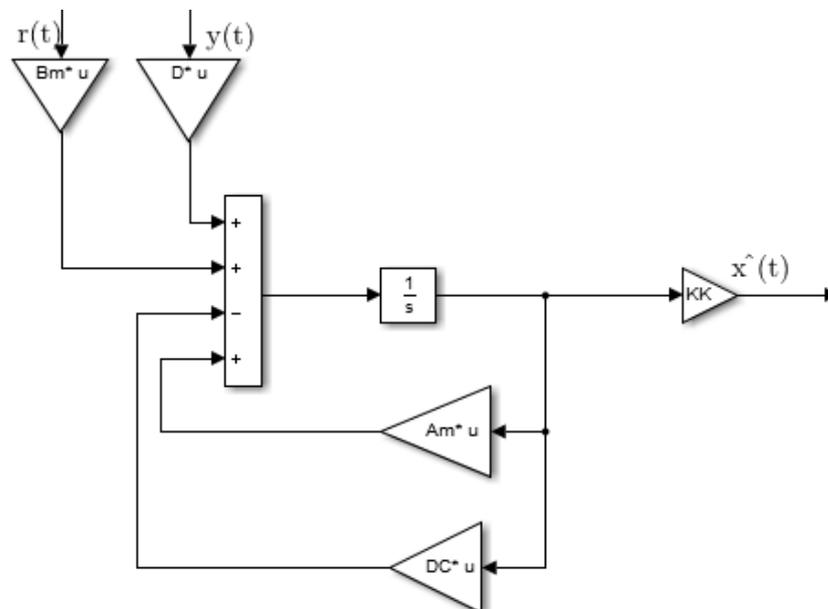


Рисунок 15 – Структурная схема наблюдателя

На рисунке 16, представлены результаты проведенного исследования. Были получены временные характеристики системы (46), (48), (52) при параметрической идентификации математической модели ОИ. Система имеет желаемую динамику настройки параметров и высокую точность.

Из приведенных графиков видно (см рисунок 16), что в течение 60 секунд система стабилизируется, т.е. поведение настраиваемой модели объекта управления начинает совпадать с поведением объекта идентификации. Алгоритмы настройки  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $K$  со временем принимают постоянные значения, а значит процесс идентификации завершается.

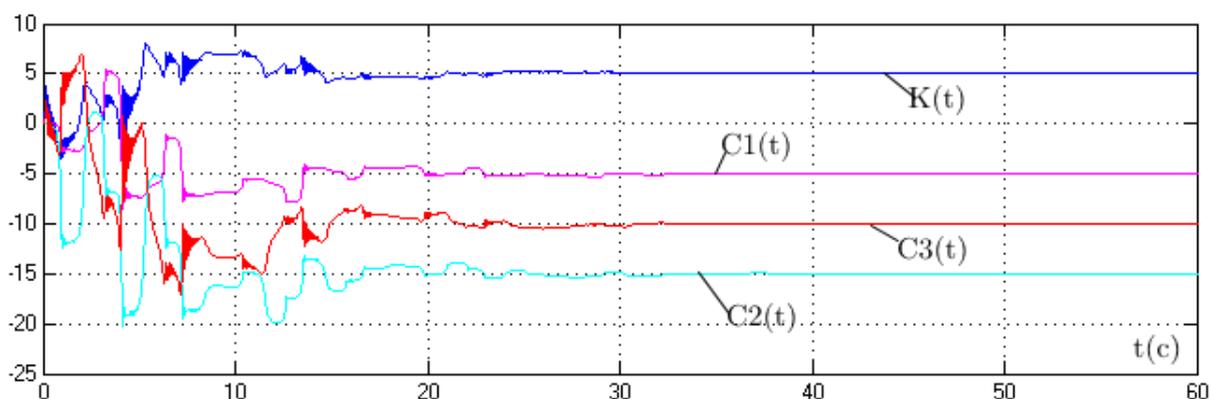


Рисунок 16 – Динамика процессов настройки системы (46), (48), (52)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Рассогласование объекта идентификации и настраиваемой модели (см. рисунок 17) меньше 1%. Что свидетельствует о том, что быстродействующий наблюдатель не влияет на процесс настройки.

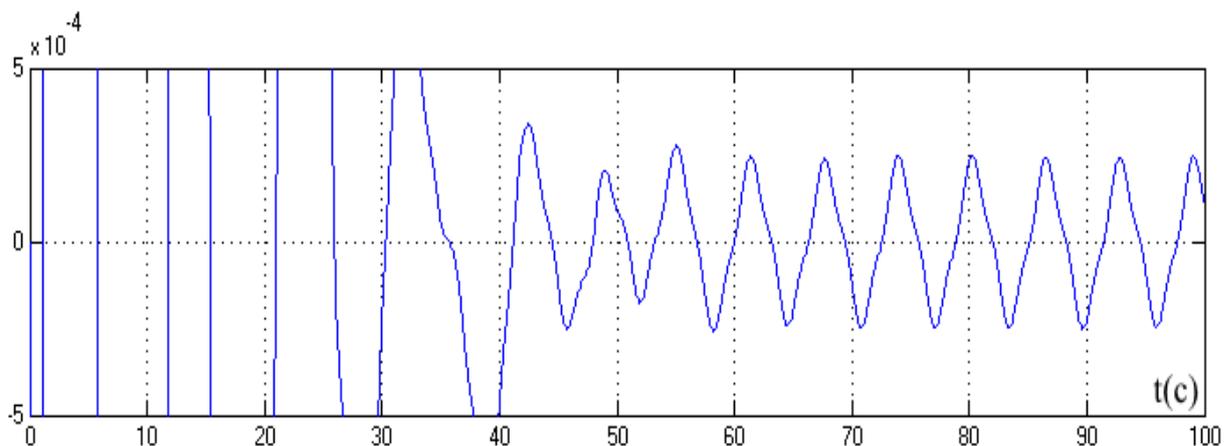


Рисунок 17 – Рассогласование выходов ОИ(46) и настраиваемой модели(48)

Simulink схема системы представлена в приложении А.

### 5.3 Имитационное моделирование системы с фильтром-корректором

Для иллюстрации и оценки качества адаптивной системы с параметрической идентификацией (55), (59), (61) приведем числовые значения:

Настраиваемая модель:

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -24 & -26 & -9 \end{pmatrix},$$

$$g^T = (1 \quad 6 \quad 8.75);$$

объект идентификации:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -7 & -11 & -5 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix},$$

$$C^T = (1 \ 0 \ 0)$$

сигнал идентификации:

$$r(t) = 4 \cdot (\sin(t) - 2 \cdot \sin(3 \cdot t)).$$

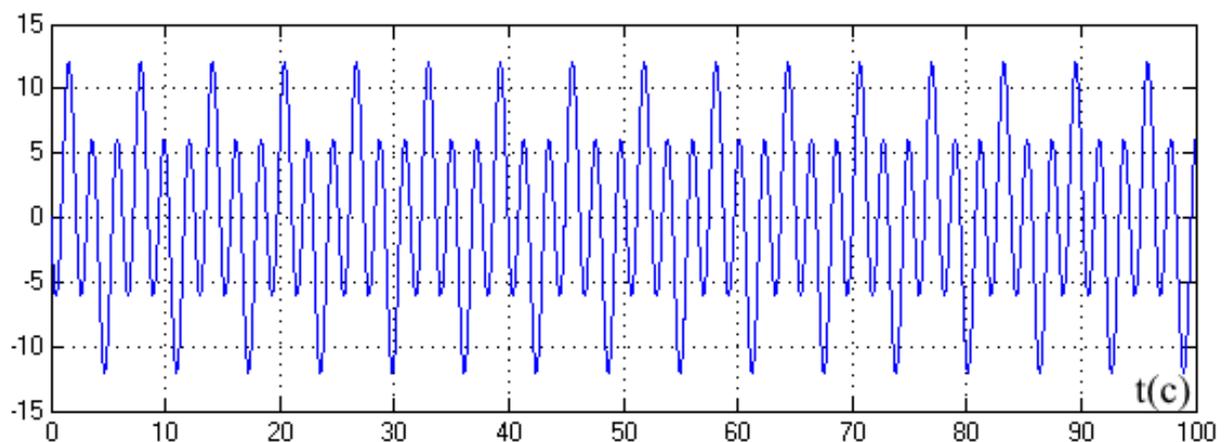


Рисунок 18 – График сигнала идентификации

Для ФК (50) был задан полином  $\delta(s) = s^2 + 6s + 8.75$  и определён параметр  $T^* = 0,001$  исходя из соотношения (16), для получения достаточно малой зоны диссипативности при имитационном моделировании.

Передаточная функция фильтра-корректора имеет вид:

$$W(s) = \frac{s^2 + 6s + 8.75}{0.000001s^2 + 0.006s + 1}.$$

Параметры адаптивного регулятора (см. рисунок 2) с алгоритмами самона-

стройки выбраны следующим образом:  $H_1 = 10, H_2 = 10, H_3 = 15, h = 7$ .

Как видно из рисунка 19, настройка параметров проходит с высокой точностью и желаемой динамикой. Фильтр-корректор не влияет на настройку за счет малой зоны диссипативности.

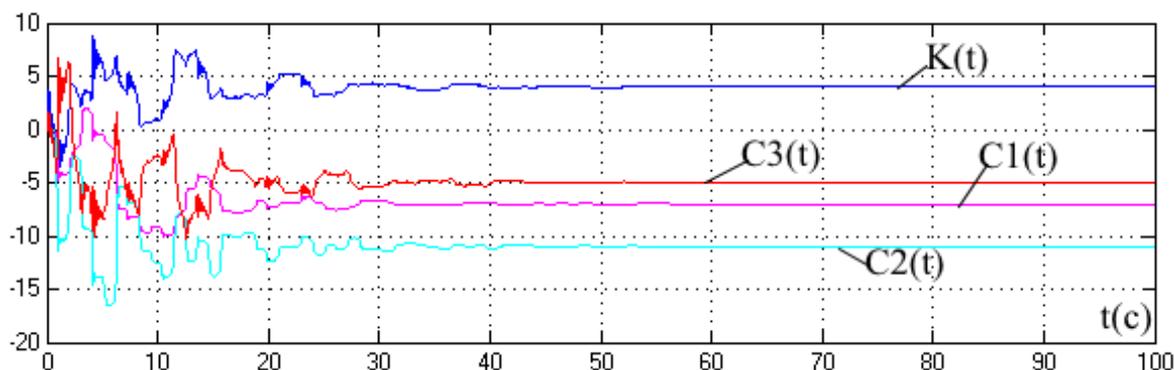


Рисунок 19 – Динамика процессов настройки системы (55), (59), (61)

Из представленных рисунков видно, что исследуемая система обладает хорошим качеством работы и имеет высокую точность. Рассогласование объекта идентификации и настраиваемой модели (см. рисунок 20) меньше 1%, что в свою очередь показывает, что фильтр-корректор успешно справляется со своей задачей.

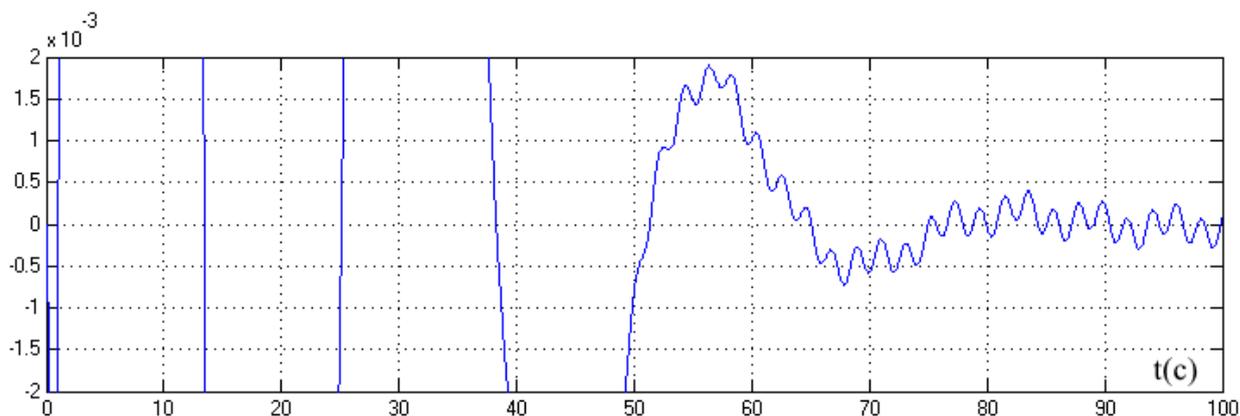


Рисунок 20 – Рассогласование выходов ОИ(55) и настраиваемой модели(59)

Simulink схема системы представлена в приложении Б.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования, был изучен алгоритм адаптивной идентификации параметров линейного объекта, функционирующего в условиях априорной неопределенности. На основе теоритических результатов решается задача управления объектом, идентификации параметров.

На основе критерия гиперустойчивости были синтезированы и построены системы адаптивной параметрической идентификации, функционирующие в условиях априорной неопределенности, с недоступным для измерения вектором переменных состояния. Для решения задачи недоступных измерению переменных состояния применялись дополнительные устройства: быстродействующий наблюдатель полного порядка, фильтр-корректор. Построенные системы имеют высокую точность и качественную динамику, удовлетворяют всем целевым условиям.

Функционирование объекта управления в реальных условиях, характеризуется недоступностью или же неполной доступностью измерению переменных состояний. Использование быстродействующего наблюдателя обеспечивает эффективность получения оценки переменных состояния. В результате исследования было выявлено, что наблюдатель не влияет на идентификацию параметров линейного объекта.

Фильтр-корректор так же предназначен для извлечения недоступных измерению переменных состояния. В ходе имитационного моделирования удалось уменьшить зону диссипативность, за счет подбора параметра  $T=0,001$  (малая постоянная времени). Что в свою очередь, дало адаптивной системе с параметрической идентификацией хорошую динамику и настройку коэффициентов регулятора.

Идентификация параметров один из важных этапов при проектировании адаптивных систем управления. Идентификация (оценивание) позволяет определить текущие значения параметров и в соответствии с полученными значениями перестроить параметры регулятора системы. Идентификация нашла свое приме-

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		66

нение в таких областях как: диагностика и управление, распознавание образов, энергетике, машиностроении, авиации, экономике, физике, геологии, принятие решений и регулирования (в промышленности), медицине и т.д.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		67

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Фрадков, А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: бесперебойные методы /А.Л. Фрадков. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат.лит., 1990. – 296 с.
- 2 Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния: Пер. с англ./Под ред. Н.С. Райбмана – М.: Мир, 1975. – 676 с.
- 3 Райбман, Н. С. Идентификация объектов управления (обзор) / Н. С. Райбман. // Автомат. и телемех.,. – 1979. – выпуск 6. – С. 80–93
- 4 Попов, В.М. Гиперустойчивость автоматических систем /В.М. Попов. – М.: Наука, 1970. – 456 с.
- 5 Якубович, В.А. Абсолютная неустойчивость нелинейных систем управления / В.А. Якубович // Автоматика и телемеханика. –1970. – № 12.1. – С. 5–14.
- 6 Landau, I.D. Adaptive Control Systems. The Model Reference Approach / I.D. Landau. – N.Y.: Dekker, 1979. – 406 с.
- 7 Еремин, Е.Л. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости / Е.Л. Еремин, А.М. Цыкунов. – Бишкек: Илим, 1992. – 182 с.
- 8 Якубович, В.А. Частотная теорема в теории управления / В.А. Якубович. //Сиб. Мат. журн. – 1973. – №2. – С. 384–420.
- 9 Лурье, А.И. К теории устойчивости регулируемых систем / А.И. Лурье, В.Н. Постников // Прикладная математика и механика. – 1994. – № 8. Вып. 3. С. 246–248.
- 10 Семичевская, Н.П. Нелинейное робастное управление нестационарными объектами со стационарным наблюдателем /Н.П. Семичевская // Информатика и системы управления. – 2006. – №1(11). – С.202–211.
- 11 Еремин, Е.Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. II. / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2007. – № 1(13). – С. 130–139.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		68

12 Еремин, Е.Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. III / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С. 153–164.

13 Еремин, Е.Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурных возмущениях. IV / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2(36). – С. 100–106.

14 Еремин, Е.Л. L-диссипативность гиперустойчивой системы управления при структурном возмущении. I / Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2006. – № 2(12). – С. 94–101.

15 Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ./ Под ред. Я.З. Цыкунова. – М.: Наука Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.

16 Райбман, Н.С. Что такое идентификация? / Н.С. Райбман. – М.: Наука, 1970. – 117 с.

17 Штейнберг, Ш.Е. Идентификация в системах управления./ Ш.Е. Штейнберг. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 81 с.

18 Еремин, Е.Л. Адаптивная параметрическая идентификация динамических объектов с относительной степенью передаточной функции больше единицы. / Е.Л. Еремин, Л.В. Ильина // Информатика и системы управления – Благовещенск. – 2001. – №1(1). – С. 82–89.

19 Краснова, С.А. Каскадный синтез наблюдателя состояния для нелинейных систем при наличии внешних возмущений / С.А. Краснова // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 3–26.

20 Еремин, Е.Л. Адаптивная система управления с эталонным учредителем и стационарным наблюдателем для SISO-объектов с запаздыванием по управлению. / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко // Информатика и системы управления – Благовещенск. – 2007. – №1(13). – С. 140–149.

21 Семичевская, Н.П. Нелинейное робастное управление нестационарными объектами со стационарным наблюдателем / Н.П. Семичевская // Информатика и системы управления. – 2006. – №1(11). С.202–211.

22 Еремин, Е.Л. Робастное управление нелинейным типом-объектом с запаздыванием и стационарным наблюдателем / Е.Л. Еремин, Н.В. Кван, Н.П. Семичевская // Информатика и системы управления. – 2009. – №1(19). С.121–129.

23 Еремин, Е.Л. Робастное управление нелинейной системой с фильтр-корректором / Е.Л. Еремин, Л.В. Чепак // Информатика и системы управления. – 2014. – №1(39). – С. 115–126.

24 Еремин, Е.Л. Робастная система управления с фильтр-корректором для объекта с запаздыванием / Е.Л. Еремин, Л.В. Чепак // Информатика и системы управления. – 2014. – №2(40). – С. 138–146.

25 Еремин, Е.Л. Адаптивное управление объектами с запаздываниями по состоянию в системах с динамическим корректором / Е.Л. Еремин // Вестник ТОГУ. – 2013. – №2(29). – С. 69–80.

26 Еремин, Е.Л. Адаптивное управление объектами с запаздываниями по состоянию в системах с динамическим корректором // Е.Л. Еремин // Информатика и системы управления. – 2012. – №3(33). – С. 169–178.

27 Еремин, Е.Л. Адаптивная система для объекта с запаздыванием по управлению в схеме с динамическим корректором и эталонным упредителем / Е.Л. Еремин, И.Е. Еремин // Информатика и системы управления. – 2013. – №4(38). – С. 111–120.

28 Описание Matlab и Simulink: сайт MathWorks [Электронный ресурс]. 2016. URL: <http://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения: 08.06.2016).

29 Цыпкин, Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука; Физматлит., 1995. – 296 с.

30 Шкарлет, Н.П. Исследование алгоритмов адаптивной идентификации параметров линейного объекта без измерения производных его выхода/ Н.П. Шкарлет // сб. науч. тр. – Хабаровск. – 2016. – С. 186–192.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

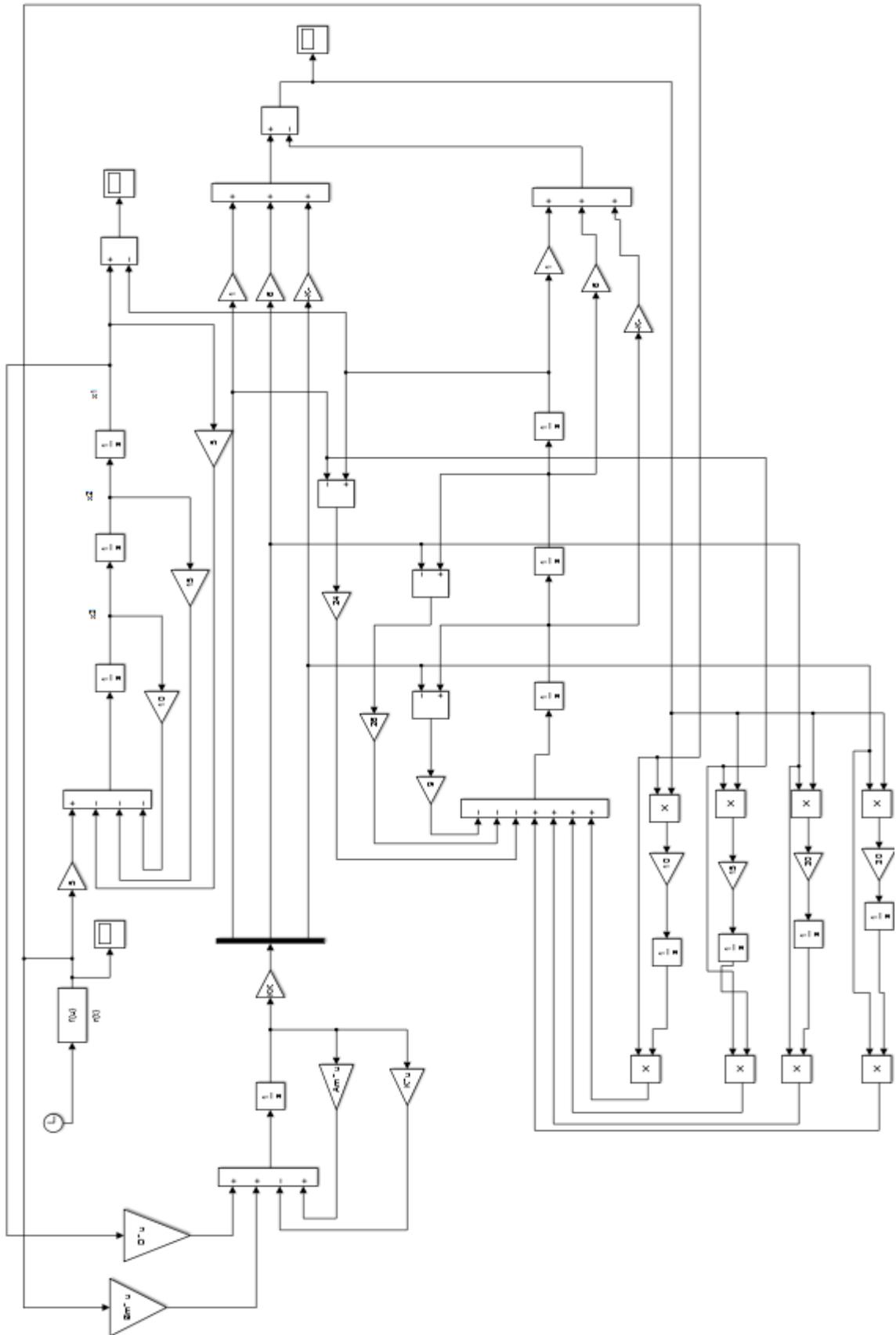


Рисунок А.1 – Адаптивная система с параметрической идентификацией и быстродействующим наблюдателем

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

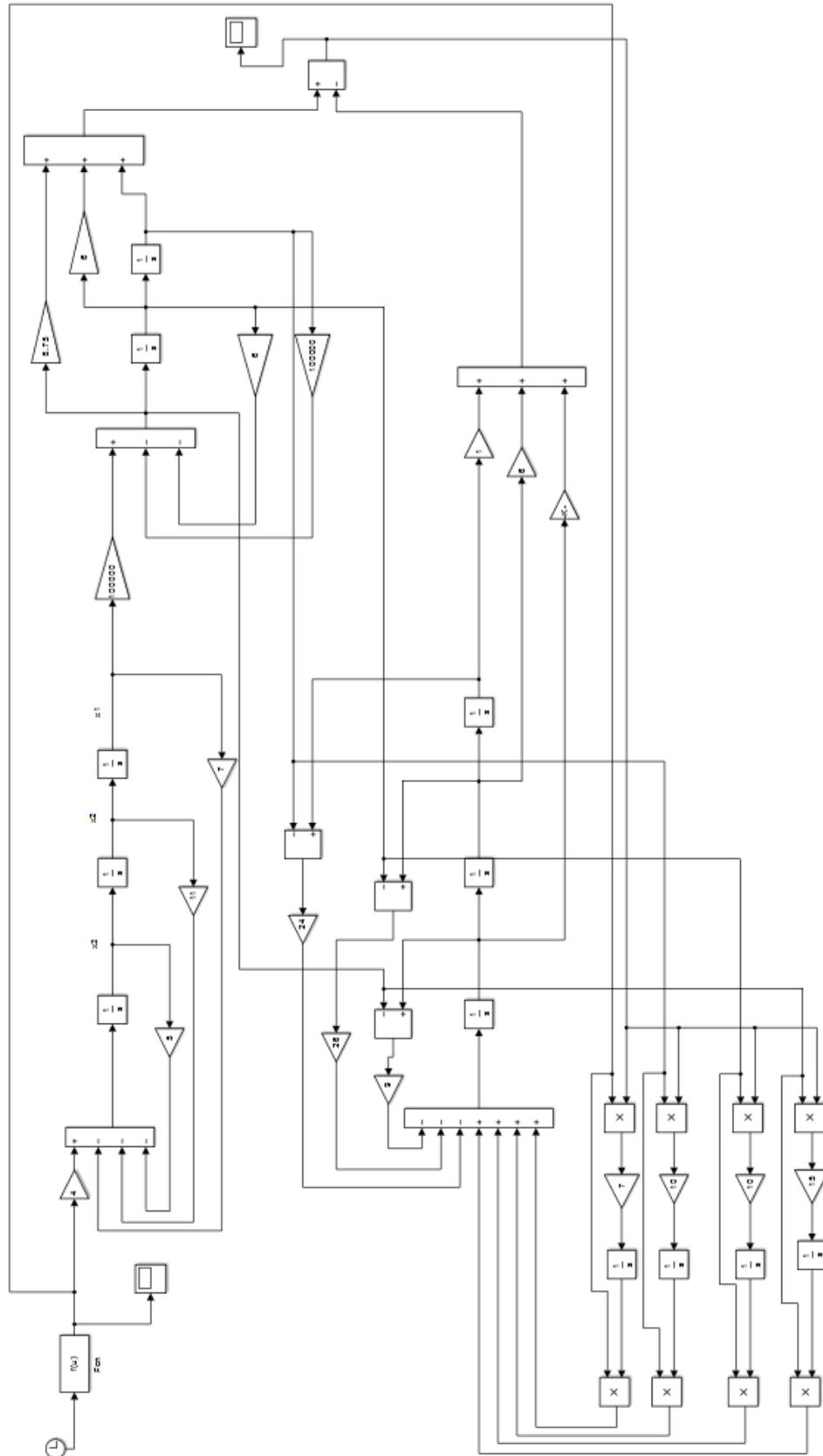


Рисунок Б.1 – Адаптивная система с параметрической идентификацией и фильтром-корректором

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

*ВКР.125026.09.03.01.ПЗ*

# ПРИЛОЖЕНИЕ В

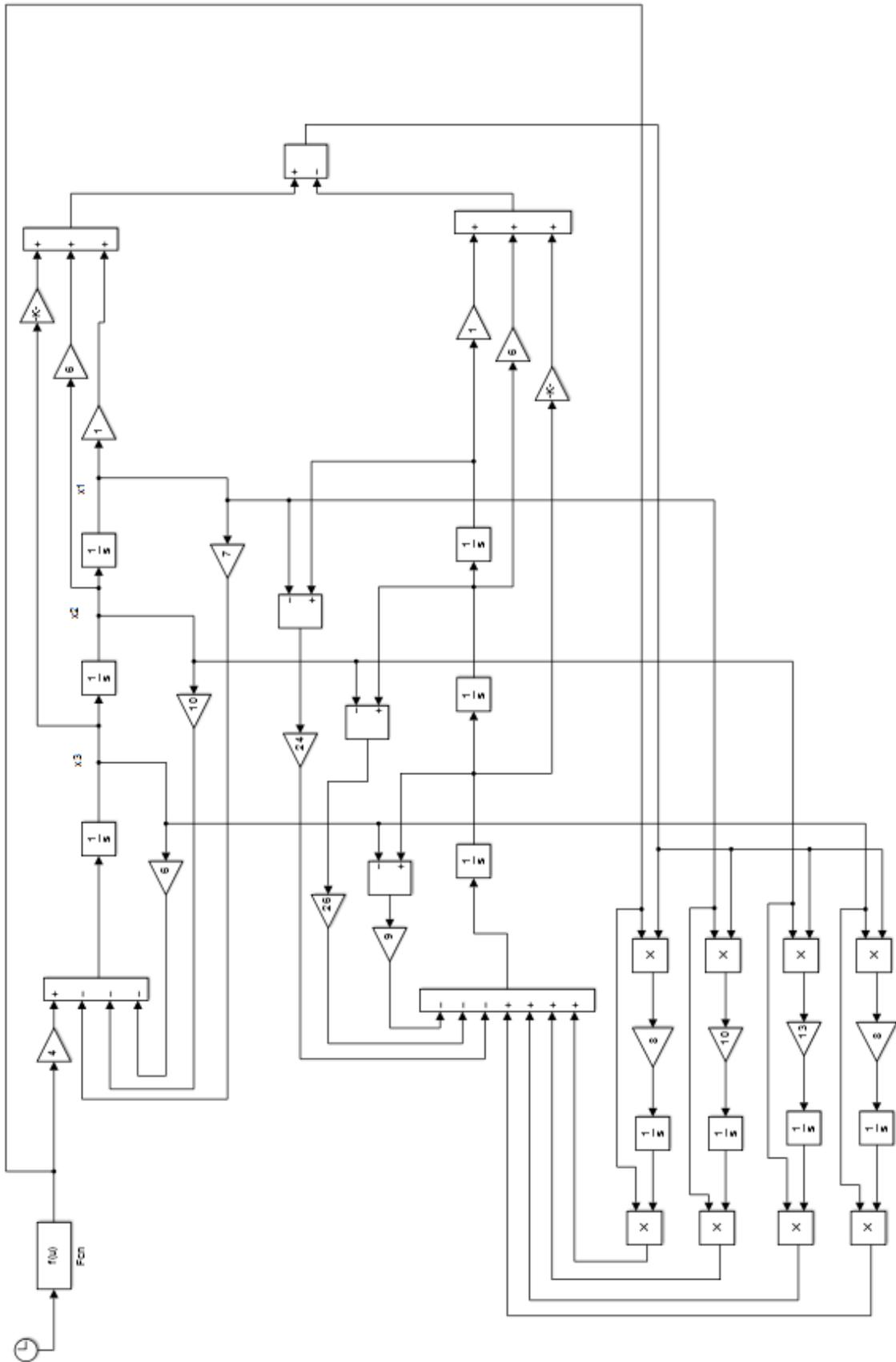


Рисунок В.1 – Адаптивная система с параметрической идентификацией с доступными для измерения переменными состояния

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

*ВКР.125026.09.03.01.ПЗ*

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Листинг программы расчета наблюдателя:

$a_0=15;$

$a_{31}=-24; a_{32}=-26; a_{33}=-9;$

$A_m=[0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1; a_{31} \ a_{32} \ a_{33}]$

$B_m=[0; 0; 1]$

$C=[1 \ 0 \ 0]$

$AM=30000*a_0$

$T=[1 \ 0 \ 0; -a_{33} \ 1 \ 0; -a_{32} \ -a_{33} \ 1]$

$D=(T^{(-1)})*[3*AM+a_{33}; 3*AM^2+a_{32}; AM^3+a_{31}]$

$DC=D*C$

$G=[1 \ 6 \ 8.75]$

$SYS = ss(A_m-DC,D,G,0)$

$SYS = tf(SYS)$

$[NUM,DEN] = tfdata(SYS,'v')$

$KK=(DEN(1,4)/NUM(1,4))$

$SYS1 = ss(A_m,B_m,C,0)$

$SYS1 = tf(SYS1)$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Тихоокеанский государственный университет»

**Информационные технологии XXI века**

Сборник научных трудов

Хабаровск

Издательство ТОГУ

2016

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		75

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

УДК 001:37:004  
ББК 3973я431  
И741

**Информационные технологии XXI века** : сб. науч. тр. – Хабаровск :  
И741 Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 451 с.  
ISBN 978-5-7389-1972-5

В сборнике опубликованы научные работы, посвященные актуальным вопросам применения современных информационных и коммуникационных технологий в автоматике, электронике, измерительной технике, образовании, медицине и промышленно-экономических системах.

Для магистрантов, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области информационных технологий, измерительной техники и автоматики.

УДК 001:37:004  
ББК 3973я431

**ISBN 978-5-7389-1972-5**

© Тихоокеанский государственный  
университет, 2016  
© Коллектив авторов, 2016

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		76

СОДЕРЖАНИЕ

**Информационные технологии в автоматике, электронике  
и измерительной технике**

<i>Шалобанов С. В., Шалобанов С. С.</i> Поиск дефектов в системах автоматического управления на основе смены позиции входного сигнала.....	4
<i>Константинов К. В., Смольский А. С.</i> Определение импеданса литий-ионного аккумулятора .....	8
<i>Иванов В. Э.</i> Аналоговый накопительный сумматор.....	14
<i>Богачев И. В., Левенец А. В.</i> Применение нейронной сети для классификации телеметрических кадров .....	18
<i>Богачев И. В., Левенец А. В.</i> Способ сжатия телеметрических данных с адаптацией по алгоритму.....	27
<i>Воронин В. В., Давыдов О. А.</i> Мониторинг технического состояния локальных вычислительных сетей.....	36
<i>Смоляков А. А., Сай С. В.</i> Реализация метода Хафа для поиска прямых линий в изображениях в среде Matlab.....	50
<i>Марченко О. А., Гайдамака Е. Э., Константинов К. В.</i> Исследование методов настройки регуляторов систем автоматического управления..	55
<i>Дьякова А. А., Левенец А. В.</i> Программный симулятор работы одноранговой сети.....	64
<i>Отческий С. А.</i> Повышение точности триангуляционного метода определения позиции АН-ПА.....	72
<i>Куприянова О. В., Левенец А. В.</i> Оценка вероятностей ошибок в двоичных симметричных каналах связи с различными видами помехоустойчивого кодирования.....	79
<i>Куприянова О. В., Левенец А. В.</i> Адаптивные способы передачи данных в информационно-измерительных системах.....	87
<i>Захаров И. С., Сай С. В.</i> Анализ эффективности применения кодов Рида-Соломона в составе каскадных кодов в канале с аддитивным белым гауссовым шумом.....	95
<i>Матус А. К., Шалобанов С. В.</i> Исследование динамических свойств систем автоматического управления и структурных функций чувствительности в среде Xcos Scilab.....	101
<i>Жиба Г. В., Сай С. В.</i> Оценка помехоустойчивости турбо-кода.....	110
<i>Qin Hongwu, Fan Qinyin, Chye En Un, Voronin V. V., Ovcharuk V. N., Shalobanov S. V.</i> After Vibration Frequency Flow on the Impact with Fatigue of Fan Blade.....	119
<i>Wei Wei, Xue Peng, Chye En Un, Voronin V. V.</i> An improved Calculation Model and Prediction Method of Hot-spot Temperature for Oil-immersed Transformers.....	125

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

<i>Duanyuan Bai, Chunyang Wang.</i> Fractional order controller design for Proportional fractional order system.....	129
<i>Zou Ji, Zhang Chao, Wang Ju, Ren Liye, Bai Duanyuan.</i> Research of Wind-light composite System Based on Fractional Order Control Systems.....	135
<i>Xiaoli Wang, Liye Ren.</i> Research on Key Technology of Local Image navigation Method for Visual-impaired person.....	140
<i>Wang Ju, Hong Mei, Chunyan Nie.</i> The Design of Facial expression recognition system based on the LabVIEW.....	145
<i>Фомина Е. С.</i> Возможности реконструкции донной поверхности на основе гидроакустических данных.....	150
<i>Кучма М. О., Лелянов Б. Н., Шеленок Е. А.</i> Имитационная модель циклов роста и падений в экономике.....	157
<i>Чье Ен Ун, Шеленок А. А., Шеленок Е. А.</i> Синтез комбинированных алгоритмов системы адаптивного управления нестационарным объектом периодического действия.....	161
<i>Жгунов А. Н.</i> Исследование алгоритмов системы нелинейного робастного управления нестационарным объектом с относительным порядком $\rho > 1$ .....	167
<i>Красносельский Р. А.</i> Исследование алгоритмов адаптивной системы слежения для линейного SISO-объекта в условиях помех.....	176
<i>Шкарлет Н. П.</i> Исследование алгоритмов адаптивной идентификации параметров линейного объекта без измерения его производных.....	186
...	

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА БЕЗ ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ ВЫХОДА

Исследуется алгоритм адаптивной идентификации параметров априорно неопределенного линейного объекта. Восстанавливаются недоступные измерению переменные пространства состояний с использованием быстродействующего наблюдателя полного порядка.

**Ключевые слова:** адаптивная идентификация, наблюдатель, имитационное моделирование.

### Введение

Наличие неопределенности является фундаментальным свойством процесса математического моделирования. Одной из важнейших в математическом моделировании является проблема идентификации, под которой обычно понимается выбор структуры модели (структурная идентификация) и совокупности значений параметров (идентификация параметров), соответствующих выбранной структуре. Поэтому соотношение структуры данных об объекте моделирования со структурой модели является важнейшим этапом процесса идентификации. Уже на этом этапе исследователь часто сталкивается с проблемой неопределенности в виде неоднозначности решения задачи идентификации.

Проблеме идентификации посвящено большое количество работ, в которых рассматривались основные методы идентификации, оценивания параметров, состояния систем управления, практическое использование [1 – 4].

Известно, что в условиях априорной неопределенности синтез контура адаптивной параметрической идентификации устойчивых объектов возможен только тогда, когда доступны измерению его переменные состояния. В противном случае для решения этой проблемы необходимо применять некоторые дополнительные меры [5]. В частности, применяется быстродействующий наблюдатель Люенбергера [6 – 9], фильтр-корректор [10 – 11], динамический корректор [12 – 14].

В работе при решении задачи синтеза алгоритма идентификации параметров линейного объекта, функционирующего в классе априорной неопределенности, предлагается использовать метод настраиваемой модели, а также быстродействующего наблюдателя Люенбергера, с помощью которого получаются оценки для недоступных измерению переменных состояний.

### Математическое описание объекта и постановка задачи

Рассматривается объект идентификации (ОИ), динамика которого описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A \cdot x(t) + B \cdot r(t), \\ y(t) &= x(t), \end{aligned} \quad (1)$$

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

где  $x(t) \in \mathbb{R}$  – вектор переменных состояния ОИ,  $r(t)$  – сигнал идентификации,  $y(t) \in \mathbb{R}$  – выходной сигнал ОИ, матрица  $A$  – гурвицева, матрица состояний ОИ,  $B^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]$  – вектор управления, функционирует в условиях априорной неопределенности

$$A = A(\xi), B = B(\xi) \quad (2)$$

где  $\xi$  – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству  $\Xi$ . Причем структура матрицы  $A$  и вектора  $B$  известна и может быть представлена в виде:

$$A = (A_{НП} + B_0 \cdot C_0^T), \quad B = B_0 \cdot K_0, \quad (3)$$

где  $K_0$  и  $C_0$  – неизвестная скалярная величина и вектор,  $A_{НП}$  – нильпотентная матрица.

Настраиваемая модель, описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dx_n(t)}{dt} &= N(x_n(t) - x(t)) + A_H(t)x(t) + B_H(t)r(t), \\ y_n(t) &= x_n(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где матрица  $N$  – гурвицева, а матрица  $A_H(t)$  и вектор  $B_H(t)$  имеют структуры, подобные (3) и заданные в виде:

$$A_H(t) = (A_{НП} + B_0 \cdot C^T(t)), \quad B_H(t) = B_0 \cdot K(t), \quad (5)$$

Относительно ошибки рассогласования  $e(t) = x(t) - x_H(t)$  для системы (1), (3), (4), (5) можно записать эквивалентное математическое описание

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= N \cdot e(t) + B_0 \cdot \mu(t), \quad v(t) = g^T \cdot e(t), \\ \mu(t) &= -[(C(t) - C_0)^T \cdot x(t) + (K(t) - K_0) \cdot r(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

Так как, вектор переменных состояний ОИ (1) недоступен измерению, то воспользуемся моделью быстродействующего наблюдателя полного порядка. Вектор его переменных состояний  $\hat{x}(t)$  совпадает с вектором переменных состояний объекта идентификации  $x(t)$  и доступен для измерения. Структура наблюдателя описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= F \cdot \hat{x}(t) + H \cdot y(t) + B \cdot r(t) = (N - DC^T) \cdot \hat{x}(t) + D \cdot y(t) + B \cdot r(t), \\ \hat{y}(t) &= C^T \cdot \hat{x}(t), \\ \hat{v}(t) &= g^T \cdot \hat{y}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}$  – вектор переменных состояния наблюдателя,  $\hat{v}(t)$  – обобщенный выход наблюдателя, матрица  $F$  – произвольная, гурвицева,  $D$  – матрица коэффициентов наблюдателя, где значения элементов матрицы  $N$  вычисляются из условия равенства соответствующих коэффициентов полиномов  $\det(sE - N)$  и  $\det(sE - N + DC^T)$ .

В работе [8] показано, что обычно собственные значения матрицы  $(N - DC^T)$  задают так, чтобы желаемые корни ее характеристического полинома  $\det(sE - N + DC^T)$  выбирались из условия

$$\min_j \operatorname{Re}(-p_j) \geq \Theta \max_i \operatorname{Re}(-p_i), \quad \Theta \geq 3, \quad (8)$$

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

где  $p_j, p_i$  соответственно характеристические числа матриц  $N$  и  $(N - DC^T)$ .

*Постановка задачи.* Требуется в условиях априорной неопределенности (2) определить значение элементов матрицы  $A$  и вектора  $B$  таким образом, чтобы имело место выполнение следующих предельных условий:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{x}(t) - x_{\text{н}}(t)) &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (A_{\text{ИП}} + B_0 \cdot C^T(t)) &= A_{\text{ИП}} + B_0 \cdot C_0^T = A = \text{const}, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (B_0 \cdot K(t)) &= B_0 K_0 = B = \text{const}. \end{aligned} \quad (9)$$

### Синтез алгоритма контуров адаптации

Синтез системы адаптации с параметрической идентификацией опирается на использования критерия гиперустойчивости [15].

*Первый этап.*

Эквивалентное математическое описание запишем, используя оценки, полученные с выхода наблюдателя (7), в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{e}(t)}{dt} &= N \cdot \hat{e}(t) + B_0 \cdot \hat{\mu}(t), \hat{v}(t) = g^T \cdot \hat{e}(t), \\ \hat{\mu}(t) &= -[(C(t) - C_0)^T \cdot \hat{x}(t) + (K(t) - K_0) \cdot r(t)] \end{aligned} \quad (10)$$

*Второй этап.*

Обеспечим разрешимость ИНП. Для этого запишем интеграл для нелинейной части системы (9):

$$\eta(0, t) = -\int_0^t \hat{\mu}(s) \cdot \hat{v}(s) ds = \int_0^t [(C(s) - C_0)^T \cdot \hat{x}(s) + (K(s) - K_0) \cdot r(s)] \cdot \hat{v}(s) \cdot ds, \quad (11)$$

и определим самонастройки вектора  $C(t)$  и скалярной величины  $K(t)$  синтезировать следующим алгоритмам

$$\begin{aligned} \frac{dC(t)}{dt} &= H_i \cdot \hat{x}(t) \cdot g^T \cdot \hat{e}(t), \\ \frac{dK(t)}{dt} &= h_i \cdot r(t) \cdot g^T \cdot \hat{e}(t), \\ h &= \text{const} > 0, H_i = \text{const} > 0, i = \overline{1 \dots n}, \end{aligned} \quad (12)$$

то для интеграла (10) будет справедлива оценка

$$\begin{aligned} \eta(0, t) &\geq -\frac{1}{2}(C(0) - C_0)^T \cdot H^{-1}(C(0) - C_0)^T - \frac{1}{2}(K(0) - K_0)^2 \cdot h^{-1} = \\ &= -h_0 = \text{const} < 0, \\ &\forall t > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, было показано выполнение требований ИНП и осуществлено определение явного вида алгоритмов самонастройки.

*Третий этап.*

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

На данном этапе синтеза решается проблема вещественности и строгой положительности передаточной функции ЛСЧ системы (9), имеющая в данном случае вид:

$$W(s) = g^T (sE - N)^{-1} B_0 = \frac{g^T \text{adj}(sE - N) B_0}{\det(sE - N)} \quad (14)$$

Для которой выполняется частное условие:

$$\text{Re} [g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0] > 0, \forall \omega > 0, \quad (15)$$

достаточно за счет выбора значений вектора  $g$ , расположить корни полинома

$$g^T (j \cdot \omega \cdot E - N)^{-1} B_0 \quad (16)$$

число которых  $(n-1)$ , в порядке их последовательного чередования с  $n$  корнями полинома  $\det(sE - N)$ .

*Четвертый этап.*

Так как выполнено ИНП и передаточная функция ЛСЧ вещественна и строго положительна, то следует что система (10) является асимптотически гиперустойчивой. Также, учитывая вид алгоритмов самонастройки, будут выполнены целевые условия (9).

### Имитационное моделирование

Имитационное моделирование проводилось с использованием математического пакета MATLAB, в среде визуального моделирования Simulink.

Для иллюстрации и оценки качества адаптивной системы с параметрической идентификацией (1) – (9), (10) приведем числовые значения:

Настраиваемая модель:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -24 & -26 & -9 \end{pmatrix}, \mathbf{g}^T = (1 \quad 6 \quad 8.75); \quad (17)$$

Объект идентификации:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -24 & -26 & -9 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}, \mathbf{C}^T = (1 \quad 6 \quad 8.75); \quad (18)$$

Сигнал идентификации:

$$r(t) = 4 \cdot (\sin(t) - 2 \cdot \sin(3 \cdot t)); \quad (19)$$

Наблюдатель (см. рис. 2) сформируем с учетом параметров настраиваемой модели, а вектор  $D$  рассчитаем исходя из (8) и зададим в виде

$$D^T = (224991 \quad 16872975055 \quad 421723137374715) \quad (20)$$

Параметры контура адаптации (см. рис 2):  $H_1 = 15, H_2 = 30, H_3 = 30, h = 5$ .

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

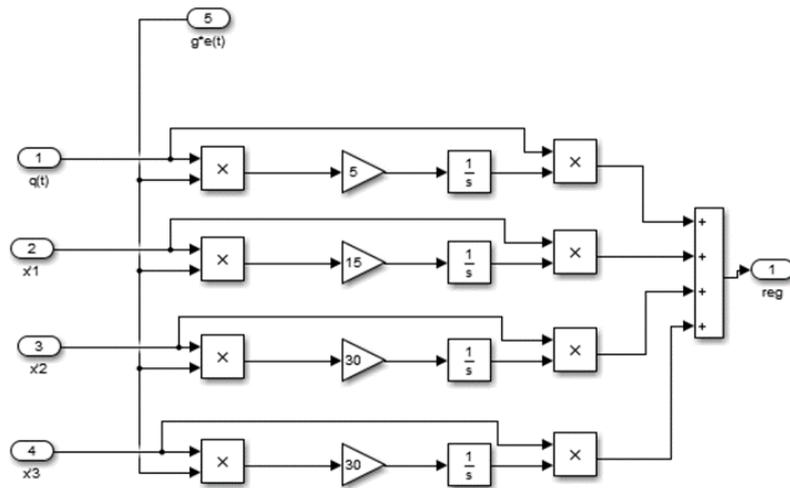


Рис. 1 – Структурная схема контура адаптации (11).

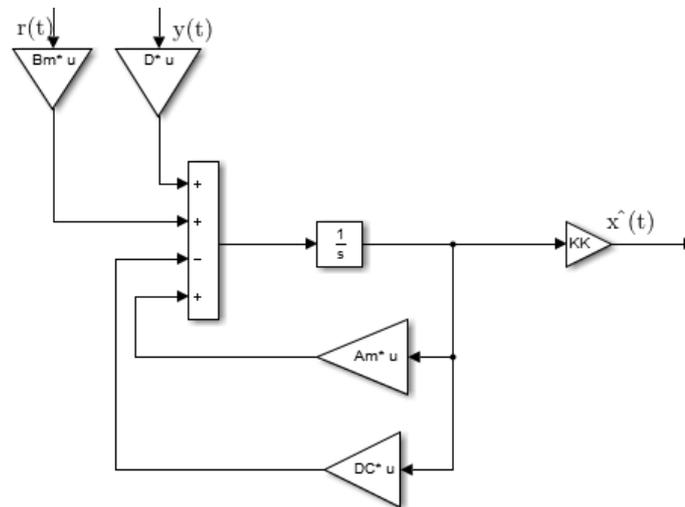


Рис. 2 – Структурная схема наблюдателя (7).

На рисунке 3, представлены результаты проведенного исследования. Были получены временные характеристики системы (1), (3), (4), (5), (10) при параметрической идентификации математической модели ОИ.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

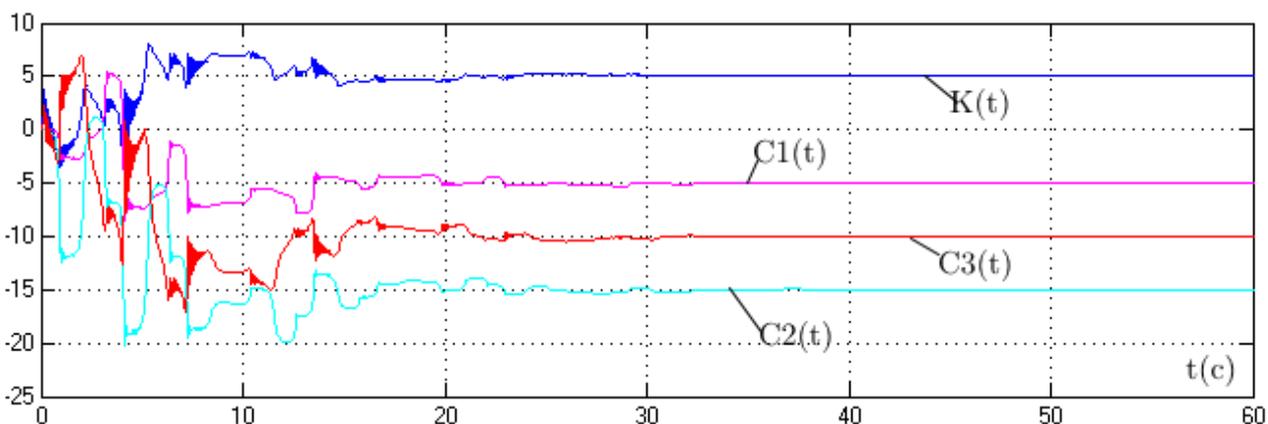


Рис. 3 – Динамика процессов настройки системы (1), (3), (4), (5), (10).

### Заключение

В результате проведенного исследования, был изучен алгоритм адаптивной идентификации параметров линейного объекта, функционирующего в условиях априорной неопределенности, с недоступными для измерения вектором переменных состояний. Для восстановления недоступного вектора переменных состояний был использован быстродействующий наблюдатель Люенбергера. Полученная система имеет высокую точность настройки параметров линейного объекта и отвечает всем предъявленным требованиям.

### Список литературы

- [1] Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ./ Под ред. Я.З. Цыкунова. – М.: Наука Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991.
- [2] Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния: Пер. с англ./Под ред. Н.С. Райбмана – М.: Мир, 1975.
- [3] Райбман Н.С. Что такое идентификаци? – М.: Наука, 1970.
- [4] Штейнберг Ш.Е. Идентификация в системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
- [5] Еремин Е.Л., Ильина Л.В. Адаптивная параметрическая идентификация динамических объектов с относительной степенью передаточной функции больше единицы. //Информатика и системы управления – Благовещенск, 2001. - №1(1). – С. 82-89.
- [6] Краснова С.А. Каскадный синтез наблюдателя состояния для нелинейных систем при наличии внешних возмущений //Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 3-26.
- [7] Еремин Е.Л., Теличенко Д.А. Адаптивная система управления с эталонным учредителем и стационарным наблюдателем для SISO-объектов с запаздыванием по управлению. //Информатика и системы управления – Благовещенск, 2007. - №1(13). – С. 140-149.
- [8] Семичевская Н.П. Нелинейное робастное управление нестационарными объектами со стационарным наблюдателем // Информатика и системы управления. – 2006. – №1(11). С.202 – 211.
- [9] Еремин Е.Л., Кван Н.В., Семичевская Н.П. Робастное управление нелинейным  $\text{time}$ -объектом с запаздыванием и стационарным наблюдателем // Информатика и системы управления. – 2009. – №1(19). С.121 – 129.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

[10] Еремин Е.Л., Чепак Л.В., Робастное управление нелинейной системой с фильтр-корректором // Информатика и системы управления. – 2014. №1(39). С. 115-126.

[11] Еремин Е.Л., Чепак Л.В., Робастная система управления с фильтр-корректором для объекта с запаздыванием // Информатика и системы управления. – 2014. №2(40). С. 138-146.

[12] Еремин Е.Л. Адаптивное управление объектами с запаздываниями по состоянию в системах с динамическим корректором // Вестник ТОГУ. – 2013. №2(29). С. 69 – 80.

[13] Еремин Е.Л. Адаптивное управление объектами с запаздываниями по состоянию в системах с динамическим корректором // Информатика и системы управления. – 2012. №3(33). С. 169 – 178.

[14] Еремин Е.Л., Еремин И.Е. Адаптивная система для объекта с запаздыванием по управлению в схеме с динамическим корректором и эталонным упредителем // Информатика и системы управления. – 2013 №4(38). С. 111 – 120.

[15] Попов В.М. Гиперустойчивость автоматических систем. – М.: Наука, 1970.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		85

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Д

Научное издание

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА**

Сборник научных трудов

Ответственный за выпуск *Е. А. Шеленок*

Отпечатано с оригиналов авторов

Подписано в печать 03.06.16. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага писчая. Гарнитура «Таймс».

Печать цифровая. Усл. печ. л. 26,33. Тираж 70 экз. Заказ \_\_\_\_.

Издательство Тихоокеанского государственного университета.

680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Отдел оперативной полиграфии издательства Тихоокеанского государственного университета.

680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

					<i>ВКР.125026.09.03.01.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86