

На правах рукописи



Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан

**ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ С РЕЗЕРВНОЙ ЭЛИТНОЙ ПОПУЛЯЦИЕЙ
В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ И АДАПТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ**

Специальность 05.13.01
«Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Грачев Александр Николаевич

Официальные оппоненты: Привалов Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Тульский
государственный педагогический
университет им. Л.Н. Толстого»,
профессор кафедры информатики и
информационных технологий

Кислицын Вадим Юрьевич, кандидат
технических наук, ОАО НПО
«Стрела», начальник сектора

Ведущая организация: Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
университет «МИЭТ»»,
г. Зеленоград, Московской обл.

Защита состоится «26» декабря 2014 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.05 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (www.tsu.tula.ru).

Автореферат разослан «06» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Соколова
Марина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Большинство современных объектов управления таковы, что их точное математическое описание либо отсутствует, либо изменяется в процессе работы в достаточно широких пределах. Необходимость поддержания работоспособности систем управления в условиях априорной неопределенности, а также плавных или резких (непредвиденных) изменений параметров объектов привела к развитию большого числа разнообразных численных методов, сейчас обычно называемых «классическими» алгоритмами идентификации и адаптации. Большой вклад в развитие данных методов внесли многие зарубежные и российские ученые, такие как Гроп Д., Ивахненко А.Г., Красовский А.А., Льюнг Л., Мелса Дж.Л., Райбман Н.С., Растринин Л.А., Сейдж Э.П., Стрейц В., Цыпкин Я.З., Эйкхофф П. и др.

Известно, что модальные регуляторы, использующие информацию о состоянии объекта, обладают более широкими возможностями коррекции динамики в замкнутых системах управления, чем регуляторы по выходу (например, классические ПИД-регуляторы), поэтому возникает необходимость восстановления состояния объекта в режиме функционирования системы управления. Кроме того, методы оценивания состояния динамических объектов в реальном времени имеют собственную значимость, например, в задачах трассового сопровождения целей радиолокационных систем (РЛС) и т.п. Большинство современных методов оценивания состояния динамических объектов построено на базе широко известного фильтра Р. Калмана. Кроме него большой вклад в развитие современных методов адаптивной и нелинейной фильтрации внесли Бьюси Р.С., Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л., Красовский А.А., Ли Р., К. Браммер, Г. Зиффлинг., Пугачев В.С., Сеницын И.Н., Grewal M.S., Haykin S., Julier S.J., Uhlmann J.K., Simon D. и др.

Отдельный интерес представляют адаптивные системы управления, одной из главных особенностей которых является наличие в них контуров параметрической идентификации и оценивания вектора состояния, так называемые системы совместного оценивания. Использование таких систем особо актуально при управлении сложными динамическими объектами, для которых характерна неопределенность и нестационарность их параметров, а также отсутствие возможностей непосредственного измерения основных режимных переменных. К классу таких сложных динамических объектов можно отнести, например, рудно-термические электропечи (РТП), в которых в настоящее время получают широкий спектр различных продуктов: начиная с ферросплавов, корунда, карбида кальция, и заканчивая, желтым фосфором.

С математической точки зрения решение описанных выше прикладных задач идентификации и оценивания в динамических системах сводится к оптимизации некоторой заранее заданной функции потерь или критерия. Традиционные методы оптимизации, например, градиентные методы, метод наименьших квадратов, стохастическая аппроксимация и т.п., как правило, используют большое количество различной априорной информации и допущений. Кроме того, в реальной жизни проблема, которая была поставлена изначально, может претерпеть существенные изменения в процессе своего решения. При использовании традиционных методов в этом случае все вычисления необходимо начинать

заново, что приводит к большим затратам машинного времени и другим неудобствам.

Появившийся в конце 70-х годов XX века, благодаря работам Холланда Дж., а также его учеников Голдберга Д. и Де Йонга К., эволюционный подход к решению оптимизационных задач, основанный на использовании так называемых генетических алгоритмов (ГА), лишен многих недостатков классических методов оптимизации. Он практически не требует никаких допущений относительно целевой функции и ее производных, что значительно расширяет класс задач, которые можно решать с помощью ГА. Более того, ГА позволяют решать те проблемы, решение которых традиционными алгоритмами затруднительно либо вообще невозможно.

Однако, большинство задач, для решения которых в настоящее время используются ГА – это задачи оптимизации различных сложных неунимодальных функций многих переменных. При этом относительно высокие требования к производительности вычислительных средств, предъявляемые такими алгоритмами, их разработчиков не смущают. Объясняется это, во-первых, тем, что других методов решения подобных задач практически не существует, если не считать классических методов случайного поиска, а во-вторых, решение подобных задач, как правило, не лимитировано по быстродействию, т.е. они не относятся к так называемым задачам реального времени.

По этой причине ГА относительно редко используются для решения задач идентификации, адаптации и оценивания в динамических системах реального времени. Хотя, с одной стороны, вычислительные мощности современных компьютеров очень сильно возросли, а с другой стороны, очевидно, существует множество способов усовершенствования ГА, способствующих повышению их вычислительной эффективности. Заметим кстати, что в живой природе процессы эволюции отвечают именно за адаптацию видов к изменяющейся среде обитания, причем протекает такая адаптация явно в темпе реального времени.

Таким образом, очень перспективным направлением исследований представляется разработка эффективных с вычислительной точки зрения ГА для их использования в системах идентификации и адаптивного оценивания, функционирующих в реальном времени. Отметим также, что в последнее время все более широкое распространение получают гибридные системы, одним из элементов которых являются ГА. При этом, часть функций в таких системах выполняется ГА, а другая часть каким либо классическим методом, например, фильтром Калмана.

Цель диссертационной работы состоит в разработке, исследовании и применении при решении практических задач эффективного с вычислительной точки зрения (быстрого) ГА, предназначенного для использования в системах идентификации и адаптивного оценивания, функционирующих в реальном времени.

Основные задачи.

Для достижения поставленной в работе цели решались следующие задачи:

1. разработка быстрого ГА, предназначенного для использования в системах идентификации и адаптивного оценивания, функционирующих в реальном времени;

2. исследование основных характеристик и вычислительной эффективности разработанного быстрого ГА при решении различных задач идентификации стационарных и нестационарных динамических объектов;
3. разработка гибридных адаптивных схем с использованием быстрого ГА для трассового сопровождения интенсивно маневрирующих целей в РЛС;
4. разработка гибридных алгоритмов совместного оценивания параметров и состояния линейных динамических систем с использованием быстрого ГА для целей косвенного контроля электротермических процессов в РТП.

Методология и методы исследований. При выполнении диссертационной работы использовались: общие методы системного анализа, эволюционных вычислений, теории автоматического управления, теории идентификации динамических систем, методы теории случайных процессов и статистической обработки экспериментальных данных, методы компьютерного и имитационного моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. разработан быстрый ГА, использующий резервную элитную популяцию (РЭП) и предназначенный для систем идентификации и адаптивного оценивания, функционирующих в реальном времени;
2. на базе быстрого ГА с РЭП разработаны алгоритмы текущей и ретроспективной параметрической идентификации, минимизирующие различные виды классических функций потерь, а также алгоритмы корреляционной идентификации, исследованы их характеристики и вычислительная эффективность;
3. разработаны с использованием быстрого ГА и исследованы методами имитационного моделирования гибридные адаптивные алгоритмы $\alpha - \beta$ -фильтрации, Калмановской и расширенной Калмановской фильтрации, применяемые для трассового сопровождения интенсивно маневрирующих целей в РЛС;
4. разработаны с использованием быстрого ГА и исследованы методами имитационного моделирования гибридные адаптивные алгоритмы совместного оценивания параметров и состояния линейных динамических систем для целей косвенного контроля электротермических процессов в РТП.

Теоретическая и практическая значимость работы. Выполненные в диссертационной работе исследования дают основу для решения практических задач параметрической идентификации, адаптации, оценивания и управления широкого класса линейных динамических объектов различной природы (летательных аппаратов, РЛС, электротермических процессов и т.п.). Все разработанные алгоритмы могут быть непосредственно использованы в составе информационно-измерительных и управляющих систем соответствующих объектов, например, РЛС различного целевого назначения, а также информационно-измерительных и управляющих систем рудно-термическими и дуговыми электропечами.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре ИБ ТулГУ в преподавании курса «Идентификация и диагностика систем», а также при обучении и подготовке персонала фирм ALSEDEN General Trading Co и UR Nansha Co (Ирак), что подтверждается соответствующими справками о внедрении.

Частично результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР по гранту РФФИ «Методы математического моделирования и идентификации электротермических процессов по доступной косвенной информации для целей управления» № 13-07-00527.

Положения, выносимые на защиту:

1. разработанный быстрый ГА с РЭП при определенных условиях вполне способен конкурировать с известными классическими алгоритмами, применяемыми в системах идентификации и адаптивного оценивания, функционирующими в реальном времени;
2. разработанные на основе быстрого ГА с РЭП алгоритмы текущей и ретроспективной параметрической идентификации, могут быть применены для исследований широкого класса стационарных и нестационарных линейных динамических объектов;
3. разработанные на основе быстрого ГА с РЭП гибридные адаптивные алгоритмы $\alpha - \beta$ -фильтрации, Калмановской и расширенной Калмановской фильтрации, способны существенно улучшить качество процесса трассового сопровождения интенсивно маневрирующих целей в РЛС;
4. гибридные алгоритмы, использующие в своем составе предложенный быстрый ГА совместно с линейным или различными модификациями нелинейных Калмановских фильтров, могут быть успешно применены в системах косвенного контроля неизмеряемых непосредственно основных режимных переменных различных технологических процессов.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается, где это возможно, строгими математическими выкладками; при использовании же различных приближений, аппроксимаций и эвристик - вычислительными экспериментами, проведенными в ходе имитационного моделирования, а также результатами обработки данных, полученных на реальных технологических объектах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: на ежегодных научно-технических конференциях Тульского государственного университета (г. Тула, 2012-2014 гг.); на XII Всероссийской НТК студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов» (г. Тула, ТулГУ, 2013 г.); на VII Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (г. Томск, ТПУ, 2014 г.); на XII Всероссийском совещании по проблемам управления (Москва, ИПУ РАН, 2014 г.); на конференции в Ираке «The Second Engineering Conference of Control, Computers and Mechatronics Engineering» (ECCCM2, February 25-27, 2014).

Публикации. По теме диссертации в настоящее время опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, 4 статьи на английском языке в журналах международного издательства American V-King Scientific Publishing LTD (AVS), 3 текста докладов на всероссийских конференциях и один доклад на конференции в Ираке (на английском языке).

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 166 страницах текста и включает в себя введение, четыре главы с выводами, заключение, список

литературы из 155 наименований, также 2 приложения на 30 страницах. В тексте диссертации приведены 9 таблиц и 33 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цель и основные задачи работы, отмечаются ее научная новизна и практическая значимость, а также описывается структура диссертации.

В первой главе приведена общая постановка задач структурной и параметрической идентификации, а также адаптивного оценивания в линейных динамических системах. Кратко описаны классические способы решения этих задач.

Известно, что стандартные численные методы параметрической идентификации в случае существенного дрейфа или резких изменений параметров не всегда способны гарантировать надежное обнаружение изменений и быстродействующую адаптацию к вновь возникшим условиям при низкой вычислительной стоимости. Эти обстоятельства усиливают интерес к альтернативным решениям, в частности ГА. Однако, большинство работ в этой области ориентированы на решение задач либо ретроспективной идентификации (К. Kristinsson, G. Dumont, Leehter Yao, William A. Sethares и др.), либо на настройку нейросетевых (Цой Ю.Р., Репин А.И. и др.) или нечетких моделей (Ходашинский И.А., Лавыгина А.В. и др.).

В первой главе также сформулирована практическая задача трассового сопровождения целей в РЛС. Показано, что в случае существенного изменения ускорения цели алгоритмы трассового сопровождения, построенные на базе известных методов фильтрации ($\alpha-\beta$ или Калмановской) должны быть подвергнуты адаптации. Рассмотрены широко используемые в настоящее время для трассового сопровождения целей алгоритмы адаптивной фильтрации. В частности алгоритмы с определением момента и интенсивности маневра (А. Фарина, Ф. Студер, Я. Бар-Шалом, Х.-Р. Ли, Нгуен Чонг Лыу и др.), многомодельные (многогипотезные) методы (Я. Бар-Шалом, Х.-Р. Ли, А.И. Перов, С.З. Кузьмин, А.И. Канащенков, В.И. Меркулов и др.), а также другие подходы к решению этой задачи (С.Я. Жук, В.И. Кожевурт, В.В. Юзефович, Л.А. Фокин и др.) Отмечена сложность и недостаточная универсальность большинства из этих подходов.

Другая важная практическая задача, сформулированная в первой главе, это задача косвенного контроля основных режимных переменных электротермических процессов в РТП. Известно (Д.А. Гитгарц, А.А. Фомичев), что в этом случае может быть построена модель процессов в РТП в виде системы линейных уравнений в пространстве состояний, вектор состояний которой будет включать в себя основные неизмеряемые непосредственно режимные переменные, а вектор измерений – так называемые косвенные показатели. Таким образом, задача косвенного контроля в электротермии сводится к задаче совместного оценивания параметров и состояния, поскольку параметры и уровень шумов в объекте оценить по имеющейся априорной информации оказывается затруднительно. Показано, что алгоритмы совместного оценивания, основанные на классических методах субоптимальной нелинейной фильтрации, требуют вычисления частных производных линеаризуемых функций. Новейшие же алгоритмы, основанные на методах ансамблевой (сигма-точечной) фильтрации

используют при вычислениях матричное преобразование Холецкого. Следовательно, все эти алгоритмы достаточно сложны и трудоемки при их программной реализации, а также не всегда устойчиво работают.

Заключительная часть первой главы посвящена обзору современного состояния дел в области разработки различного типа ГА. Кратко описаны достоинства и недостатки классических ГА. Особое внимание уделено таким аспектам современных эволюционных вычислений, как использование стратегий элитизма, параллельных популяций, вещественного кодирования хромосом, использования гибридных методов на основе ГА и т.п.

Во второй главе предлагается быстрый ГА, в котором кроме обычной эволюционирующей популяции (ЭП) имеется специальная резервная элитная популяция (РЭП). Схема ГА с РЭП представлена на рис. 1.

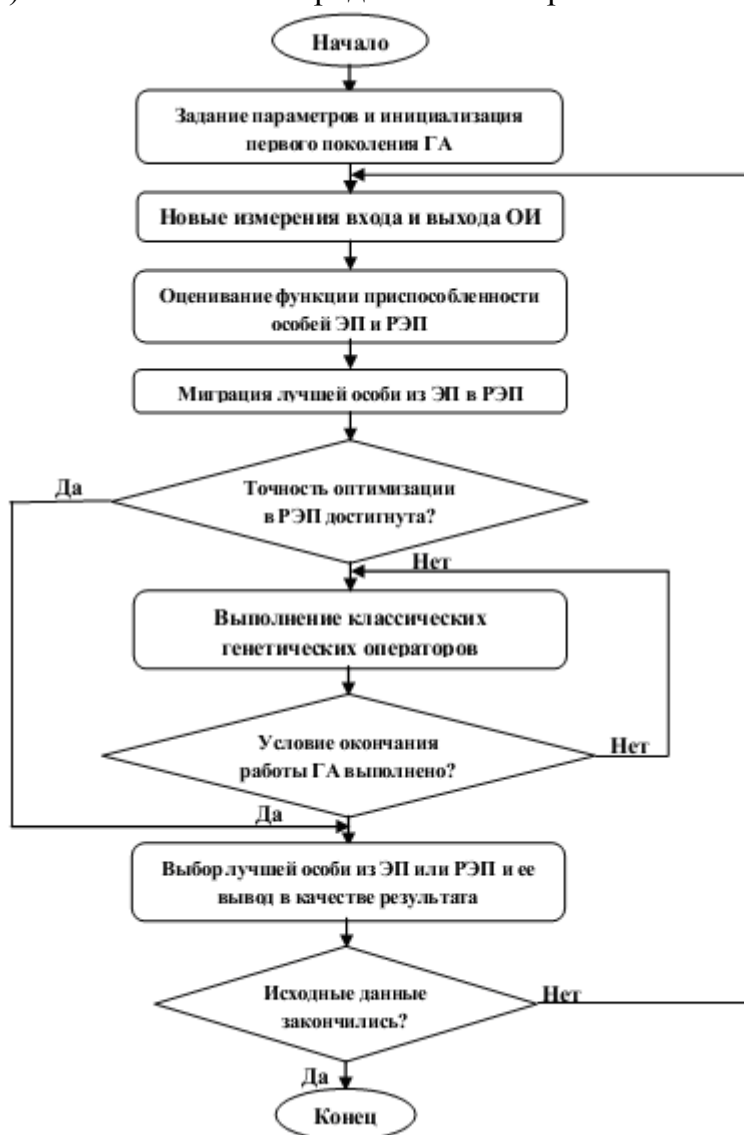


Рис.1 - Схема быстрого ГА с РЕП

Главной особенностью данного алгоритма является использование в нем дополнительной РЕП, в которую на каждом шаге измерений из текущей ЭП по определенным правилам мигрируют хромосомы (индивидуумы) с наилучшей приспособленностью, постоянно вытесняя оттуда полученные ранее менее приспособленные решения. За счет наличия РЕП удастся значительно сократить

время поиска приемлемых решений на отдельных шагах измерений по сравнению с классическим ГА, поскольку такое решение каждый раз сначала ищется в РЭП и только затем, если его там найти не удастся, включается механизм эволюции классического ГА (внутренний цикл на рис. 1). Также характерными особенностями данного алгоритма являются: использование вещественного кодирования хромосом и метода селекции поколения родителей, основанного на линейном ранжировании с «селективным давлением» равным двум.

Основные свойства и характеристики предложенного ГА с РЭП определялись путем вычислительного эксперимента по параметрической идентификации линейного динамического объекта с одним входом и одним выходом, задаваемого разностным уравнением вида:

$$y(k) = -\sum_{i=1}^p a_i y(k-i) + \sum_{j=1}^q b_j u(k-j+1) + w(k), \quad q \leq p, \quad (1)$$

где $u(k)$ и $y(k)$ - измеряемые вход и выход, соответственно; a_i и b_j - идентифицируемые параметры; $w(k)$ - шум измерений с нулевым средним и конечной дисперсией; k - дискретное время.

В качестве функции приспособленности i -й хромосомы в ГА (функции потерь от принятия соответствующего решения в задаче параметрической идентификации) использовался усредненный квадрат ошибки предсказания выхода объекта по его модели:

$$e_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} (y(k-j) - \tilde{y}_i(k-j))^2, \quad (2)$$

где n - ширина скользящего окна усреднения.

На рис. 2. показано количество поколений, необходимых для идентификации объекта (1) первого порядка ($q = p = 1$) с заданной точностью (ε) с помощью классического ГА и с помощью ГА с РЭП на каждом шаге измерений. Анализ данного рисунка позволяет утверждать о существенном преимуществе в вычислительной эффективности предлагаемого ГА с РЭП по сравнению с классическим ГА, что выражается в значительно меньшем количестве смен поколений в ЭП, происходящих при поиске приемлемого решения.

На основе ГА с РЭП был разработан также алгоритм корреляционной параметрической идентификации, использующий идею внешнего подобия корреляционных функций (Н.С. Райбман и др.). Предлагается, используя известные таблицы типовой табличной идентификации, произвести структурную и параметрическую идентификацию объекта по результатам измерений его входа и выхода в режиме нормальной эксплуатации. Таким образом, будет определен порядок и внешний вид, описывающего объект дифференциального уравнения или передаточной функции, а также начальные приближения их параметров. После

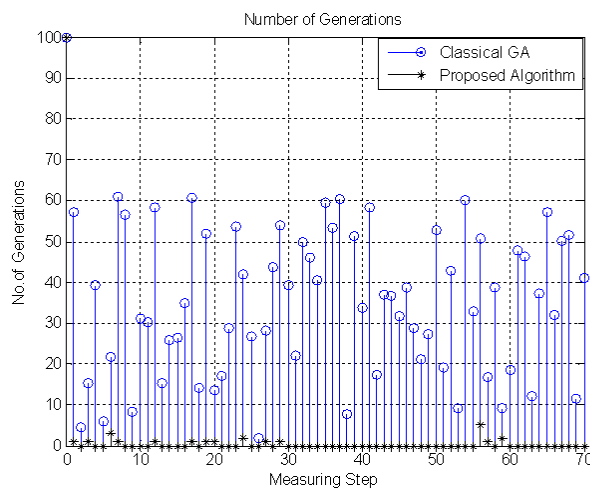


Рис. 2. Число поколений ГА и ГА с РЭП

этого можно приступить к уточнению параметров с помощью ГА с РЭП. При этом рекомендуется использовать в качестве функции приспособленности среднеквадратическое отклонение (СКО) между взаимно корреляционными функциями, рассчитываемыми по модели с идентифицируемыми параметрами и по экспериментальным данным:

$$e_i(k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n (R_{yu}^i(k) - R_{yu}^{\vartheta}(k))^2}{n-1}}, \quad (3)$$

при подаче на вход модели реального входного сигнала.

На рис. 3 представлен процесс идентификации постоянной времени простого колебательного звена второго порядка (истинное значение 0,025 с). Процесс идентификации производился в скользящем окне длиной 80 шагов измерений.

Алгоритмы параметрической идентификации на основе ГА с РЭП были исследованы при различном уровне шумов в измерениях. Так при отношении сигнал/шум ≤ 0.2 все алгоритмы работали примерно одинаково хорошо. В условиях же интенсивных шумов (отношение сигнал/шум ≥ 0.8), алгоритмы, использующие функцию приспособленности вида (3), позволяли получить оценки с меньшими СКО и смещением, чем алгоритмы, использующие функцию приспособленности вида (2). Такой результат можно объяснить хорошими фильтрующими свойствами корреляционных функций.

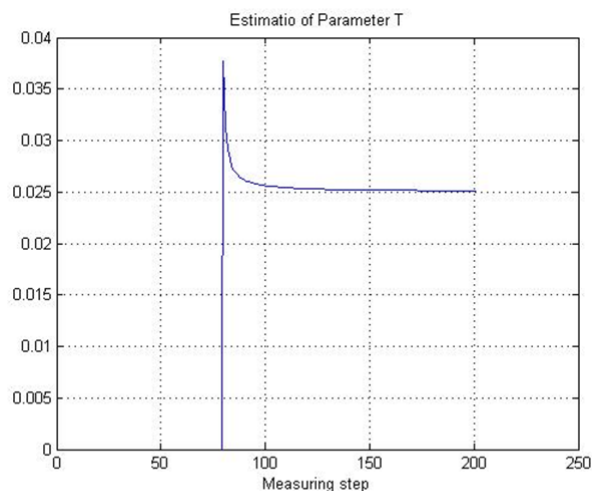


Рис. 3. Процесс идентификации T

Однако, если объект нестационарен, то преимуществами обладают алгоритмы с функцией приспособленности вида (2), причем, чем меньше n (в пределе может быть равно 1), тем быстрее будут сходиться оценки, а алгоритм будет быстрее реагировать на изменения параметров. Так на рис. 4 и 5 представлены результаты идентификации постоянной времени простого колебательного звена второго порядка, изменяющейся по линейному закону и скачкообразно, соответственно.

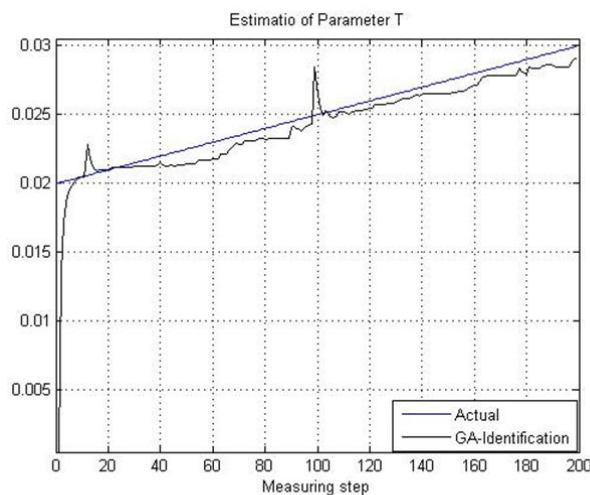


Рис. 4. Параметр меняется плавно

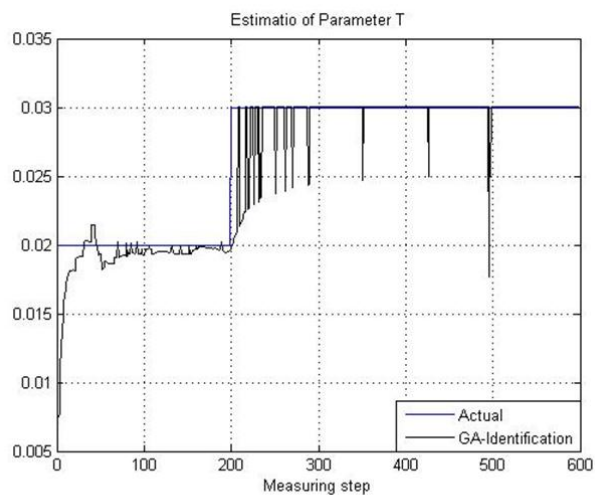


Рис. 5. Параметр меняется скачком

Учитывая стохастический характер ГА, которые даже в одних и тех же условиях имитационного моделирования способны в принципе показывать существенно различающиеся результаты, были произведены специальные серии вычислительных экспериментов (по 100 экспериментов в каждой), которые подтвердили устойчивую работу всех предлагаемых алгоритмов.

В третьей главе описано использование разработанного ГА с РЭП в задачах адаптации алгоритмов фильтрации при трассовом сопровождении сильно маневрирующих целей в РЛС.

Наиболее простыми алгоритмами трассового сопровождения целей в РЛС являются алгоритмы α - β -фильтрации, которые предназначены для сопровождения неманеврирующих целей, равномерно движущихся с практически нулевым ускорением. При этом, коэффициенты α и β изменяются, только на нескольких первых шагах измерения. В диссертации предлагается с целью повышения универсальности алгоритмов α - β -фильтрации адаптировать коэффициенты α и β в процессе трассового сопровождения с использованием быстрого ГА с РЭП. В качестве функции приспособленности в таком алгоритме используется квадрат текущего обновляющего процесса фильтра. Параметром настройки является единственный коэффициент $\alpha(k)$, поскольку коэффициент $\beta(k)$ вычисляется через $\alpha(k)$ с помощью известного соотношения (А. Фарина, Ф. Студер, С.З. Кузьмин).

В диссертации производилось имитационное моделирование трассового сопровождения цели, двигавшейся с постоянным очень малым ($a = 1\text{м/с}^2$) и относительно большим ($a = 15\text{м/с}^2$) ускорением, а также с ускорением, менявшем в процессе движения цели свой знак и величину по линейному закону. При малых ускорениях поведение предлагаемого адаптивного α - β -фильтра не отличалось от соответствующего классического аналога. При больших же ускорениях ошибки оценивания адаптивного α - β -фильтра характеризуются значительно (в 3 раза) меньшими смещениями, но при этом несколько большими значениями СКО, как показано, например, на рис. 6. При изменяющемся ускорении цели, как видно из рис. 7, классический α - β -фильтр с определенного момента вообще начинал расходиться.

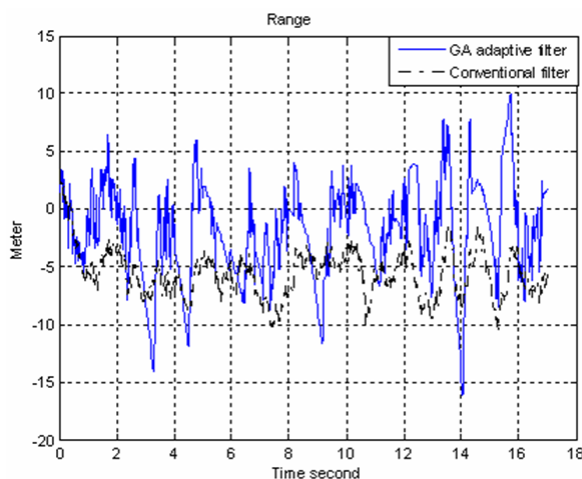


Рис. 6. Ошибка оценивания дальности
(ускорение цели $a = 15 \text{ м/с}^2$)

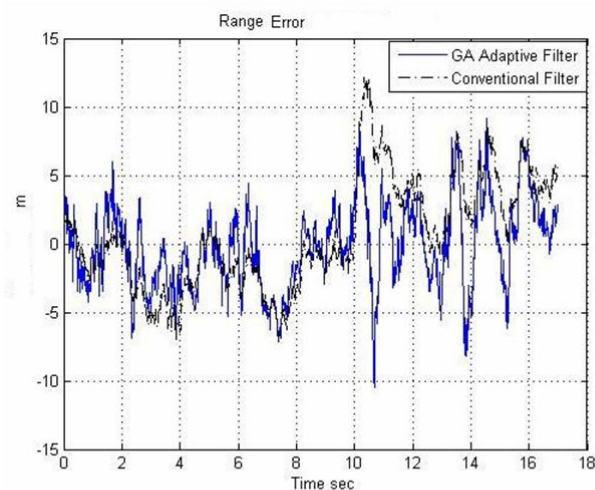


Рис. 7. Ошибка оценивания дальности
(меняющееся ускорение цели)

В отличие от α - β -фильтра классический линейный фильтр Калмана (ЛФК) с моделью движения первого порядка обеспечивает минимально возможное СКО оценивания траектории целей, движущихся с различным ускорением. Однако, при этом необходимо точно знать матрицу ковариации шума в объекте $Q(k)$, которой описывается текущее ускорение цели в фильтре. В реальных условиях ускорение цели неизвестно. Поэтому значение параметра Q может оказаться либо существенно заниженным, и тогда оценки фильтра будут смещенными или даже расходящимися, либо существенно завышенным, тогда соответствующие оценки не будут иметь минимально возможного СКО. Следовательно, необходимо в реальном времени адаптировать параметр $Q(k)$, для чего и предлагается использовать разработанный быстрый ГА с РЭП. В качестве функции приспособленности предлагается использовать нормированный квадрат текущего обновляющего процесса ЛФК

$$e(k+1) = r^T(k+1)S^{-1}(k+1)r(k+1), \quad (4)$$

где $S(k+1)$ - матрица ковариаций обновления, вычисляемая по формуле

$$S(k+1) = H(k+1)P_p(k+1)H^T(k+1) + R(k+1); \quad (5)$$

$H(k+1)$ - матрица наблюдений в фильтре; $R(k+1)$ - матрица ковариаций шумов в наблюдениях (ошибки первичных измерений в РЛС); $P_p(k+1)$ - матрица ковариаций ошибок упреждения.

В диссертации представлены результаты имитационного моделирования трассового сопровождения цели адаптивным ЛФК, аналогичного рассмотренному ранее имитационному моделированию α - β -фильтра. В целом результаты моделирования и графики ошибок оценивания получились примерно такими же, как в случае моделирования α - β -фильтра (см. рис. 6 и 7).

В диссертации рассмотрен также наиболее общий случай трассового сопровождения цели в трехмерном пространстве с учетом измерений ее радиальной скорости. При этом, задача становится нелинейной и для ее решения приходится использовать расширенный фильтр Калмана (РФК). Адаптация в реальном времени трех диагональных элементов матрицы $Q(k)$ также ведется с использованием выражений (4), (5) и ГА с РЭП. Отличие заключается лишь в том,

что $H(k+1)$ теперь не матрица наблюдений, а матрица частных производных нелинейной векторной функции наблюдений по вектору упрежденных оценок.

При имитационном моделировании процесса трассового сопровождения фактическое ускорение бралось не случайным с нормальным распределением и нулевым средним, как предполагается в классическом алгоритме фильтрации, а постоянным и равным 15 м/с^2 по всем координатным осям. Измерения производились циклически: по 7 измерений через 0,1 секунды с паузой в 1,2 секунды. Таким способом имитировалось механическое вращение антенны РЛС. Результаты сравнительного имитационного моделирования предлагаемого адаптивного РФК и классического РФК представлены на рис. 8 и 9, из которых видно, что все оценки, полученные с помощью классического РФК, обладают значительным смещением. Оценки же предлагаемого адаптивного фильтра при примерно одинаковом СКО практически не имеют смещения.

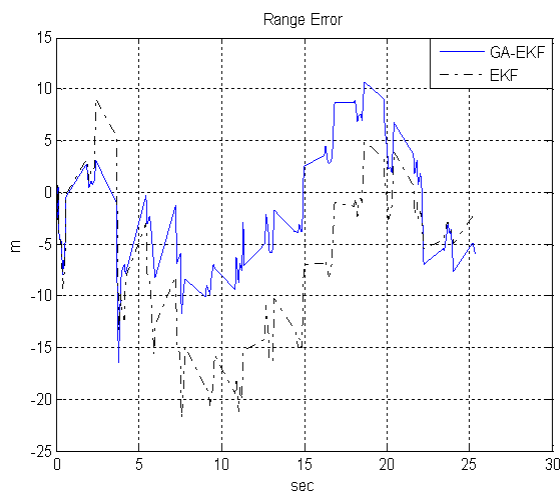


Рис. 8. Ошибка оценивания дальности

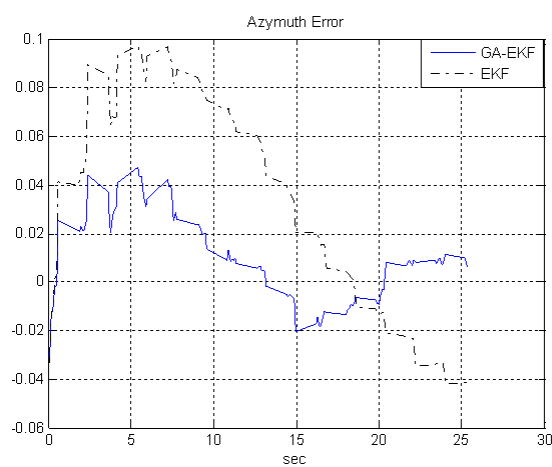


Рис. 9. Ошибка оценивания азимута

Четвертая глава диссертации посвящена решению практической задачи косвенного контроля электротермических процессов в РТП.

Сначала на основе классического ЛФК и ГА с РЭП была разработана гибридная рекуррентная процедура совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах в реальном времени. При этом, на каждом шаге измерений для текущих значений оценок параметров (т.е. хромосом текущего поколения ГА с РЭП) по известным выражениям Калмановского фильтра вычисляются упрежденные (априорные) оценки вектора состояния и вектор обновляющего процесса. После чего с использованием выражений (4) и (5) вычисляется функция приспособленности $e(k+1)$ каждой хромосомы текущего поколения, которая затем подвергается минимизации. В результате наилучшая хромосома, полученная после завершения работы ГА с РЭП, принимается за вектор текущих оценок параметров модели объекта, которые затем используются при вычислении окончательных сглаженных (апостериорных) оценок вектора состояния в ЛФК.

Предложенный гибридный алгоритм совместного оценивания был исследован методом имитационного моделирования с использованием объекта третьего порядка. Результаты исследования показали приемлемое качество оценок, как параметров, так и состояний, обеспечиваемое предлагаемым гибридным алгоритмом, в том числе и в случае нестационарности объекта, как показано на

рис. 10 и 11. Причем оценки состояния у предлагаемого алгоритма и классического РФК практически совпадают. Что же касается оценок параметров, то у предлагаемого алгоритма они практически всегда устанавливаются гораздо быстрее, а их смещение относительно истинных значений несколько меньше (см. рис. 10 и 11).

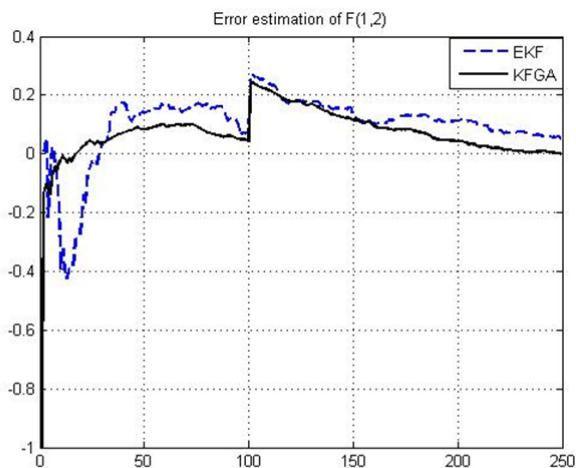


Рис. 10. Ошибка оценивания параметра, изменяющегося скачком

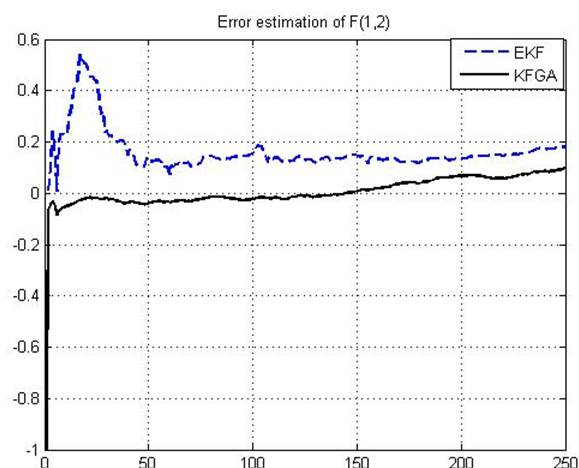


Рис. 11. Ошибка оценивания параметра, изменяющегося по линейному закону

Хорошая работа предлагаемого гибридного алгоритма в условиях нестационарности объекта, очень важна при решении задач косвенного контроля в РТП. Поскольку вероятность дрейфа параметров в таких объектах весьма высока и может быть связана с изменением химического или гранулометрического состава шихтовых материалов, а также с изменением характеристик футеровки печи в процессе ее эксплуатации. Возможно в РТП и скачкообразное изменение параметров, например, при случающихся эпизодически обвалах шихты.

В качестве примера практического использования разработанного гибридного алгоритма совместного оценивания была рассмотрена информационно-измерительная система косвенного контроля в фосфорной РТП типа РКЗ-80Ф (А.Н. Грачев, А.А. Фомичев). Линейную математическую модель РТП в пространстве состояний в этом случае можно представить следующими уравнениями:

$$M(\theta): \begin{cases} x(k+1) = \Phi(\theta)x(k) + \Gamma(\theta)u(k), & x(0) = x_0, \\ y(k) = H(\theta)x(k), \end{cases} \quad (6)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния, $u \in U \subset R^p$ – вектор управления, $y \in R^m$ – вектор наблюдения, $\Phi \in R^{n \times n}$, $\Gamma \in R^{n \times p}$ и $H \in R^{m \times n}$ – матрицы состояния, управления и наблюдения, соответственно, $\theta \in \Omega \subset R^q$ – вектор неизвестных (оцениваемых параметров), $k = 1, \dots, N$ – дискретное время, N – интервал наблюдения.

Размерности векторов данной системы заданы: $n = 7, m = 15, p = 7$. Причем вектор состояния имеет следующую структуру:

$$x^T(k) = \left[x_{\text{ЭЛ}}^1(k) \quad x_T^1(k) \quad x_{\text{ЭЛ}}^2(k) \quad x_T^2(k) \quad x_{\text{ЭЛ}}^3(k) \quad x_T^3(k) \quad x_{P3}^0(k) \right],$$

где $x_{\text{ЭЛ}}^i(k)$ – длина i -го электрода, м; $x_T^i(k)$ – объем тигля i -ой приэлектродной области, м³; $x_{P3}^0(k)$ – высота общей рабочей (углеродистой) зоны в печи, м.

Параметризация матриц Φ , Γ и H имеет следующий вид:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & 0 & f_{01} \\ 0 & \Phi_1 & 0 & f_{01} \\ 0 & 0 & \Phi_1 & f_{01} \\ f_{10} & f_{10} & f_{10} & f_{00} \end{bmatrix}; \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{00} \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & 0 & h_{01} \\ 0 & H_1 & 0 & h_{01} \\ 0 & 0 & H_1 & h_{01} \\ H_{10} & H_{10} & H_{10} & h_{00} \end{bmatrix},$$

где $\Phi_1 = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 \\ 0 & a_4 \end{bmatrix}$, $f_{01} = \begin{bmatrix} a_3 \\ a_5 \end{bmatrix}$, $f_{10} = [0 \ a_6]$, $f_{00} = a_7$, $g_{00} = \beta_2$, $\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \beta_1 \end{bmatrix}$, (7)

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \gamma_2 & 0 \\ 0 & \gamma_4 \\ 0 & \gamma_6 \end{bmatrix}, h_{01} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_3 \\ \gamma_5 \\ 0 \end{bmatrix}; H_{10} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma_7 \\ 0 & \gamma_9 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, h_{00} = \begin{bmatrix} \gamma_8 \\ 0 \\ \gamma_{10} \end{bmatrix}; \theta = [a_1, \dots, a_7, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \dots, \gamma_{10}].$$

Анализ идентифицируемости данной модельной структуры показал, что минимальным ограничением, налагаемым на неизвестные параметры θ , для того, чтобы она обладала свойством глобальной идентифицируемости, является требование априорного задания параметров β_1 и β_2 . После чего с использованием разработанного гибридного алгоритма, а также известного алгоритма совместного оценивания параметров и состояния на основе РФК была произведена сравнительная обработка экспериментальных данных, полученных на промышленной печи РКЗ-80Ф Новоджамбулского фосфорного завода (г. Тараз, Казахстан). Характерные результаты такой обработки экспериментальных данных, включающие режимную переменную общей углеродистой зоны печи ($x_{p3}^0(k)$), а также оценку одного из параметров матрицы состояния ($f_{00} = a_7$), приведены на рис. 12 и 13.

В целом результаты экспериментальной идентификации параметров и оценивания состояния модели электротермических процессов в промышленной РТП типа РКЗ-80Ф вида (6), параметризованной равенствами (7), полученные с использованием предложенного гибридного алгоритма и классического РФК, получились очень близкими. Это еще раз подтвердило принципиальную работоспособность предложенных алгоритмов.

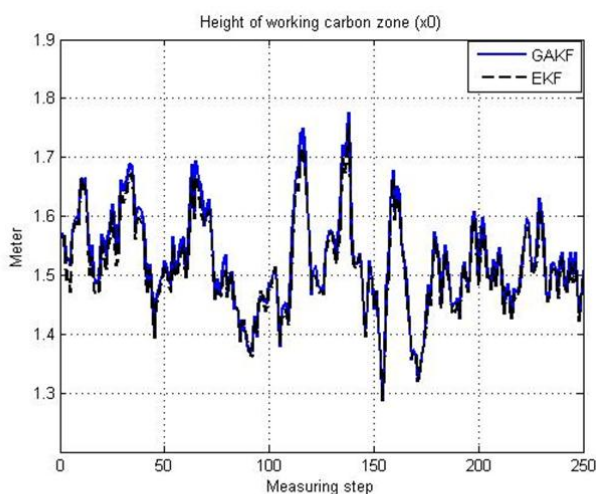


Рис. 12. Оценки высоты углеродистой зоны ($x_{p3}^0(k)$)

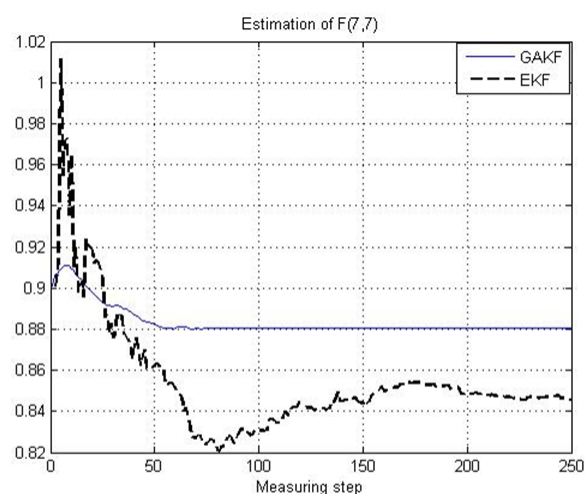


Рис. 13. Оценки параметра матрицы состояния ($f_{00} = a_7$)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполнения диссертационной работы были получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Разработанный ГА с РЭП в ряде специфических задач реального времени, а именно в задачах идентификации и адаптивного оценивания стационарных и нестационарных объектов, позволяет получать приемлемое решение за приемлемое время, демонстрируя лучшие вычислительные характеристики по сравнению с классическим ГА. Важным достоинством ГА при их использовании в задачах идентификации и адаптивного оценивания является более высокая скорость сходимости их оценок, а, следовательно, и процессов адаптации по сравнению с известными классическими методами.

2. На основе ГА с РЭП может быть построен широкий спектр алгоритмов текущей и ретроспективной параметрической идентификации, рассчитанных на различные условия использования. Например, для стационарных объектов, в которых измерения осуществляются с большим уровнем шумов, можно рекомендовать алгоритмы с функцией приспособленности в виде среднеквадратического отклонения между взаимно корреляционными функциями, рассчитываемыми по модели с идентифицируемыми параметрами и по экспериментальным данным. Такой алгоритм можно рассматривать, как развитие метода типовой табличной корреляционной идентификации, предложенного ранее Н.С. Райбманом. При идентификации же нестационарных объектов с относительно небольшими шумами измерений целесообразнее использовать алгоритмы с функцией приспособленности в виде усредненного квадрата ошибки предсказания выхода объекта по его модели.

3. Гибридные адаптивные алгоритмы трассового сопровождения целей в РЛС на основе фильтров Калмановского типа, использующие для своей адаптации ГА с РЭП, позволяют значительно расширить возможности таких алгоритмов по сопровождению сильно маневрирующих целей, ускорения которых могут изменяться в широких пределах.

4. На основе ГА с РЭП и фильтров Калмановского типа могут быть также построены гибридные алгоритмы совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах, ничем не уступающие по своим характеристикам алгоритмам на базе концепции расширения пространства состояний и методов субоптимальной нелинейной фильтрации, а в некоторых случаях, например, при нестационарности объекта, даже превосходящие их.

5. С использованием гибридных алгоритмов совместного оценивания параметров и состояния в линейных динамических системах на основе ГА с РЭП и фильтров Калмановского типа могут быть построены информационно-измерительные системы косвенного контроля различных сложных технологических процессов, что было показано на примере электротермических процессов в фосфорной РТП типа РКЗ-80Ф.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан Быстрый генетический алгоритм для приложений реального времени / Х. Аль-Сабул Али Хусейн, А.Н. Грачев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2., Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – с. 71-79.

2. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан Адаптивный расширенный фильтр Калмана для трассового сопровождения целей с использованием генетического алгоритма / Х. Аль-Сабул Али Хуссейн, А.Н. Грачев // Информатика и системы управления. – 2014. - №2(40). – С. 102-112.

3. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан Параметрическая идентификация линейных динамических объектов с использованием быстрого генетического алгоритма / Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан, А.Н. Грачев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. - №8. – С. 9-15.

Публикации в других изданиях

4. Ali Hussein Hasan Adaptive $\alpha - \beta$ -filter for Target Tracking Using Real Time Genetic Algorithm / Ali Hussein Hasan, Aleksandr N. Grachev // Journal of Electrical and Control Engineering (JECE). – 2013. - Vol. 3. - No. 4. - P. 32-38 (www.joece.org/ © American V-King Scientific Publishing)

5. Ali Hussein Hasan On-Line Parameters Estimation Using Fast Genetic Algorithm / Ali Hussein Hasan, Aleksandr N. Grachev // Journal of Electrical and Control Engineering (JECE). – 2014. - Vol. 4. - No. 2. - P. 16-21 (www.joece.org/ © American V-King Scientific Publishing)

6. Ali Hussein Hasan Simultaneous estimation of states and parameters using Kalman filter and fast genetic algorithm / Ali Hussein Hasan, Aleksandr N. Grachev, Anatoly V. Lukashenkov, Aleksandr A. Fomichev // Journal of Control Engineering and Technology (JCET). – 2014. - Vol. 4. - Iss. 2 April. - P. 153-159 (www.ijcet.org © American V-King Scientific Publishing)

7. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан Генетический алгоритм с элитной популяцией для решения задач идентификации в реальном времени / Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан // Сб. материалов XII Всероссийской НТК студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов», Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 94-98.

8. Ali Hussein Hasan Target Tracking By Adaptive EKF Using Fast Genetic Algorithm / Ali Hussein Hasan, Aleksandr N. Grachev // International Journal of Information Engineering (IJIE). – 2014. - Vol. 4. - Iss. 2, Jun. - P. 46-52 (www.vkingpub.com © American V-King Scientific Publishing)

9. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан Адаптивный генетический алгоритм для идентификации динамической системы / Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан // Сб. материалов VII Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов», (23-25 апреля 2014 г.) Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 1-4 (<http://iie.tpu.ru/smotr/exhibition/cat/1/index.php?idappl=13070>)

10. Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан Адаптивный алгоритм Калмановской фильтрации для трассового сопровождения целей с использованием быстрого генетического алгоритма / Х. Аль-Сабул Али Хуссейн, А.Н. Грачев // Материалы XII Всероссийского совещания по проблемам управления, ВСПУ-2014 (Россия, Москва, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 16-19 июня 2014 г.). – С. 9092-9103.

11. Ali Hussein Hasan State space parameter estimation using online genetic algorithms / Ali Hussein Hasan, Aleksandr N. Grachev, Saad Jabbar Abbas // Proc. Of The Second Engineering Conference of Control, Computers and Mechatronics Engineering (ECCCM2, February 25-27, 2014). – P. 92-97.