

На правах рукописи



Якшин Александр Сергеевич

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ОШИБОК В УЗЛАХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ,
ЗАДАННЫХ СТРУКТУРНЫМИ СХЕМАМИ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре «Радиотехнические системы».

Научный руководитель:

Подкопаев Борис Павлович
доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехнические системы» СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Официальные оппоненты:

Мироновский Леонид Алексеевич
доктор технических наук, профессор кафедры вычислительных систем и сетей Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП)

Полетаев Александр Михайлович
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры приемных устройств и радиоавтоматики Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации (ВКА им. А. Ф. Можайского)

Ведущая организация:

Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»), г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 21 » июня 2017 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, дом 5, ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <http://www.eltech.ru/>

Автореферат разослан «20» апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.238.03
кандидат технических наук, доцент



Шевченко М. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Для реализации насущных потребностей современного общества в высокоточном координатно-временном обеспечении разработаны и активно применяются спутниковые радионавигационные системы (СРНС). Неотъемлемой частью наземного сегмента СРНС ГЛОНАСС, обеспечивающей фундаментальную поддержку комплекса, является радиointерферометрическая сеть со сверхдлинной базой (РСДБ) «Квазар-КВО».

Высокие требования потребителей к качеству координатно-временной информации порождают необходимость опережающего улучшения характеристик всех компонентов комплекса «Квазар-КВО», в том числе и пассивных радиолокационных систем (радиотелескопов), входящих в его состав. Особенности эксплуатации этого комплекса состоят в обеспечении целостности и достоверности выходных данных в режиме реального времени, что заставляет вводить в него средства обнаружения ошибок в рабочих режимах, т. е. средства функционального диагностирования.

Задачи разработки методов функционального диагностирования и создания соответствующих алгоритмов занимают важное место в общей проблеме проектирования компонентов радиолокационных систем, в частности, систем следящего электропривода пассивных радиолокаторов (радиотелескопов) комплекса «Квазар-КВО». Эти системы состоят из большого числа электромеханических, механических и электронных функциональных элементов с весьма сложными связями между ними, поэтому, решая для них задачу повышения достоверности функционирования, приходится использовать структурные методы. Применение структурных методов позволяет решать эту задачу как для линейных систем, так и для систем содержащих статические нелинейности.

Степень разработанности темы исследования.

Средства функционального диагностирования (ФД), предназначенные для наблюдения за текущим состоянием сложных систем появились практически одновременно с самими системами. Теория и принципы построения таких средств восходят к фундаментальным работам по теории систем, выполненным К. Шенноном (С. Shannon), Р. Калманом (R. Kalman), М. Арбибом (M. Arbib) и А. Гиллом (A. Gill). Позднее большой вклад в развитие ФД управляемых систем внесли П. Франк (P.M. Frank), Р.Н. Кларк (R.N. Clark), Р. Айзерман (R. Iserman), Дж. Гетлер (J. Gertler), Р. Паттон (R. Patton), А.С. Виллски (A.S. Willsky), М. Старосвейски (M. Staroswiecki), и Э.С. Лу (X.C. Lou). Среди отечественных учёных, стоявших у истоков исследований в указанной области, в первую очередь следует отметить академика В. М. Глушкова. Последующее развитие теории и практика ФД получили в работах П.П. Пархоменко, А.В. Мозгалевского, Ю.Н. Андреева, М.Б. Игнатьева, Л.А. Мироновского, Б.П. Подкопаева, А.Н. Жирабка, А.Е. Шумского и др.

Вопросы технической диагностики, в том числе и ФД, регулярно обсуждаются на международных конгрессах The International Federation of Automatic Control (IFAC), международных конференциях и симпозиумах по контролю и диагностированию, таких как Danube Adria Association for Automation & Manufacturing (DAAAM International Vienna), Design Automation and Test in Europe (DATE), East-West Design and Test Conference (EWDTC), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), European TEST Symposium и других.

Цели и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка для компонентов радиолокационных и радионавигационных систем, представленных в виде структурных схем, методов решения задачи функционального диагностирования и связанной с ней задачи поиска управления, устойчивого к неисправности.

Для достижения этой цели потребовалось сформулировать и решить три основные задачи:

1. Разработки методов решения задачи ФД как для линейных, так и для содержащих статические нелинейности систем, заданных структурными схемами;
2. Оценки влияния дестабилизирующих факторов на качество диагностирования и разработки процедуры их компенсации;
3. Разработки метода построения управления с компенсацией ошибок для заданных структурными схемами систем рассматриваемого класса.

Научная новизна работы.

1. Разработан алгоритм построения устройств диагностирования, применимый как для линейных, так и содержащих статические нелинейности систем, заданных структурными схемами с элементами со скалярным входом и выходом.
2. Проведен анализ влияния дестабилизирующих факторов на процесс диагностирования линейных и нелинейных систем.
3. Предложена процедура минимизации влияния дестабилизирующих факторов за счет использования совместной работы наблюдателей.
4. Предложен алгоритм решения задачи построения управления с компенсацией ошибок, как для линейных, так и для нелинейных систем, заданных в виде структурных схем с элементами со скалярным входом и выходом.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенные в работе методы и алгоритмы позволяют разработчикам систем автоматического управления в составе радиолокационных и радионавигационных систем эффективно вводить в них средства ФД и строить устойчивое к неисправности управление как в линейном, так и в нелинейном случае, при условии представления объекта диагностирования структурной схемой, состоящей из подсистем вида «один вход – один выход».

Методология и методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решались с использованием математического аппарата теории автоматического управления, высшей и линейной алгебры, теории множеств и матричного исчисления.

При выполнении аналитических расчетов использовался пакет *MathCAD* и библиотека символьных вычислений *Symbolic* пакета *Matlab*. Компьютерное моделирование, подтверждающее теоретические выводы исследования, проводилось с помощью пакетов *Matlab* и *Simulink*.

Положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм построения устройств диагностирования как линейных, так и содержащих статические нелинейности систем, заданных структурными схемами, состоящих из подсистем вида «один вход – один выход».
2. Процедура минимизации влияния дестабилизирующих факторов при использовании совместной работы устройств диагностирования

3. Алгоритм решения задачи построения управления с компенсацией ошибок как для линейных, так и содержащих статические нелинейности систем, заданных структурными схемами, состоящих из подсистем вида «один вход – один выход».

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения диссертации были представлены на международных научных конференциях: 10th IEEE International Conference MMAR (Poland, 2004); Sixth International Young Scholars' Forum of the Asia-Pacific Region Countries (Vladivostok, 2005); The 16th International DAAAM symposium (Croatia, 2005); The 21st International DAAAM symposium (Austria, 2010); IASTED International Conference Signal Processing, Pattern Recognition and Applications (SPPRA 2012) (Greece, 2012); а также на российских научных конференциях: Дальневосточного государственного технического университета «Вологдинские чтения» (2004-2007 гг.); региональной научно-технической конференции Дальневосточного государственного технического университета «Молодежь и научно-технический прогресс» (2004 г.); 70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им В.И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, 2017 г.).

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе пять статей в журналах, рекомендованных ВАК.

Результаты работы были использованы при выполнении НИР по грантам РФФИ № 03-01-00791_а «Развитие алгебраических методов параметрического оценивания и диагностирования динамических систем, описываемых нелинейными моделями»; РФФИ № 07-08-00102_а «Комплексное развитие алгебраического и дифференциально-геометрического подходов для решения задач анализа и синтеза технических систем, описываемых нелинейными динамическими моделями»; РФФИ №10-08-00133_а, «Разработка методов анализа и синтеза нелинейных сингулярных динамических систем и систем с запаздыванием на основе алгебраического и дифференциально-геометрического подходов»; Минобрнауки РФ государственное задание № 1141 «Исследование, моделирование и разработка средств подводной акустики и робототехники»; Минобрнауки РФ № Т02-03.2-373; Научного фонда Дальневосточного федерального университета № 13-19-0113-м_а «Разработка теории и методов диагностирования и аккомодации к дефектам в подсистемах подводных роботов».

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Конструирования и производства радиоаппаратуры» Дальневосточного Федерального университета.

Структура и объем диссертации. Состав диссертации включает в себя: введение, четыре главы, заключение, список литературы и три приложения. Основная часть работы представлена на 133 страницах, содержит 47 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 92 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности и степень разработанности темы исследования. Сформулированы цели и поставлены задачи работы. Определены методы исследования, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе показана актуальность решения задачи повышения достоверности и целостности информации, формируемой с помощью систем спутникового координатно-временного обеспечения СРНС ГЛОНАСС и GPS, отмечена роль пассивной ра-

диолокации в развитии глобальной навигационной системы ГЛОНАСС и указаны перспективы модернизации РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» за счет включения в его состав радиотелескопов с диаметром зеркала 70м.

Подчеркнута роль и значение технической диагностики в решении задачи обеспечения надежности радиолокационных и радионавигационных систем, а также представлен обзор методов функционального диагностирования и компенсации ошибок, ориентированных на решение задачи обеспечения надежности. Результатом первой главы является сформулированная научная задача исследования.

Во второй главе приводится описание процедуры построения устройств функционального диагностирования на основе диагностических наблюдателей (рисунок 1).

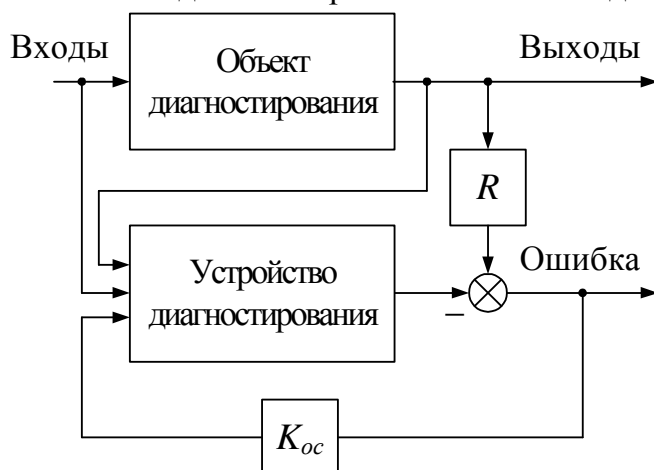


Рисунок 1 – Схема функционального диагностирования на основе диагностических наблюдателей

Для систем представленных структурными схемами, использовано матричное описание следующего вида:

$$z(p) = F(p, \vartheta)z(p) + G(p)u(p) + K\rho(p), \quad (1)$$

где компоненты вектора z размерности n представляют собой сигналы на выходах отдельных звеньев, u – вектор управления размерности l ; F и G – матрицы размера $n \times n$ и $l \times n$ соответственно, содержащие передаточные функции (ПФ) отдельных звеньев и статические нелинейности (СН); ϑ – вектор, отвечающий за ошибки в ПФ и СН: если в i -й ПФ или СН возникла ошибка, состоящая в произвольном искажении параметров этой ПФ или СН, то $\vartheta_i = 1$, в противном случае $\vartheta_i = 0$.

Слагаемое $K\rho(t)$ описывает вклад дестабилизирующих факторов, под которыми понимаются погрешности моделирования и неконтролируемые внешние воздействия на объект диагностирования (ОД). Векторная функция $\rho(t)$ размерности q считается неизвестной, постоянная матрица K указывает на то, каким образом дестабилизирующие факторы действуют на систему.

В рамках второй главы учет влияния дестабилизирующих факторов не производится, математические соотношения выводятся для случая когда $\rho(p) = 0$, а вектор ϑ содержит только нулевые компоненты, что соответствует исправной системе

Устройство функционального диагностирования (УФД) представляет собой банк диагностических наблюдателей, каждый из которых описывается следующими уравнениями:

$$z^*(p) = F^*(p)z^*(p) + G^*(p)u(p) + S(p)y(p), \quad y^*(p) = H^*z^*(p); \quad (2)$$

здесь символом «*» отмечены матрицы и векторы, относящиеся к рассматриваемому наблюдателю. При отсутствии ошибок в ОД, на обнаружение которых рассчитано УФД, должно выполняться равенство

$$r(p) = y^*(p) - Ry(p) = 0, \quad (3)$$

где R – постоянная матрица-строка, r – сигнал невязки, на основе анализа которого принимается решение о наличии или отсутствии ошибок в ОД.

Далее вводится постоянная матрица T размера $k \times n$ ($k \leq n$) такая, что в случае отсутствия ошибок выполняется равенство

$$Tz(p) = z^*(p) . \quad (4)$$

Матрица T устанавливает соответствие между компонентами векторов состояния ОД и диагностического наблюдателя.

Исходя из соотношений (1)-(4) получены матричные уравнения:

$$TF = F^*T + SH, \quad G^* = TG, \quad RH = H^*T. \quad (5)$$

Затем рассмотрен вывод основных соотношений (6):

$$F^* = TFT^T, \quad S = (TF - F^*T)H^+, \quad H^* = RHT^T. \quad (6)$$

H^+ - правая псевдообратная матрица для матрицы H .

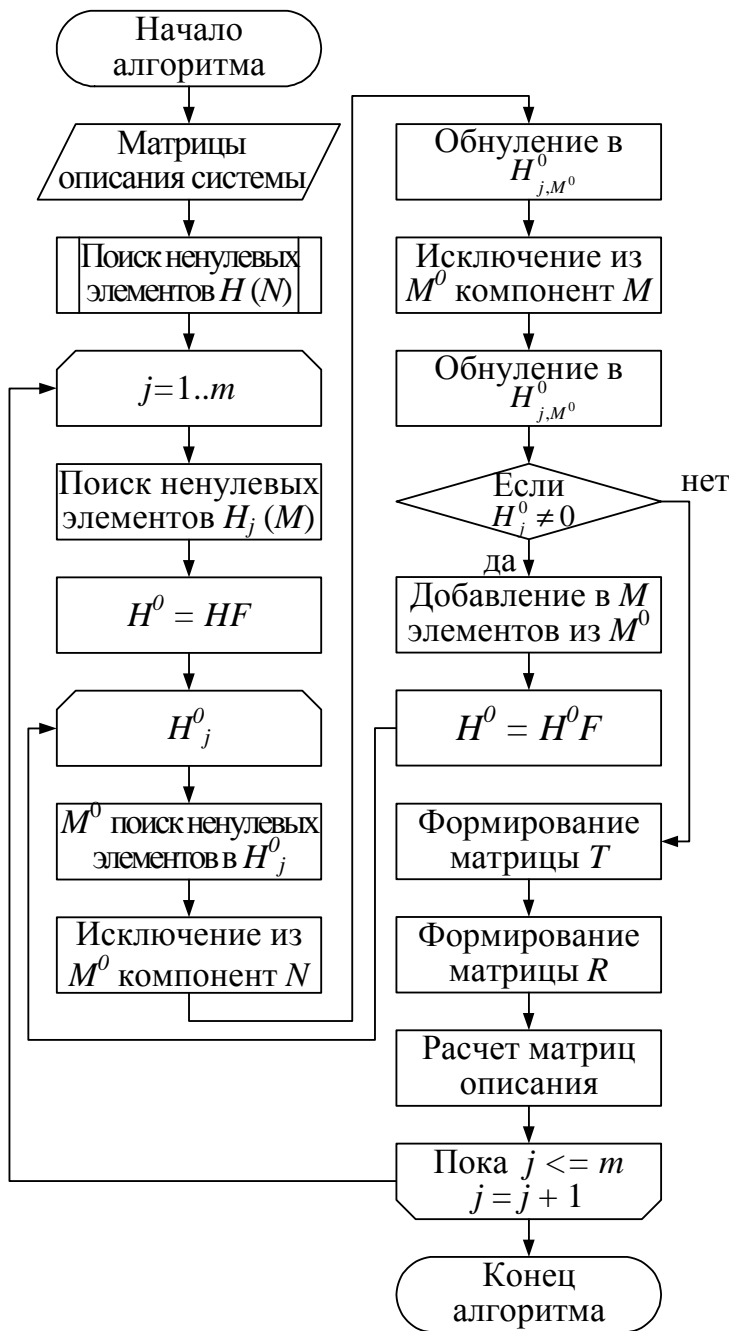


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма

Таким образом, для построения наблюдателя необходимо определить матрицы T и R , а затем, используя выражения (6) получить матрицы описания УФД.

Для построения матрицы T предложен алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 2.

Алгоритм использует свойство наблюдаемости системы и обеспечивает последовательный выбор номеров звеньев по направлению от выхода к входу, согласно структуре объекта. Результатом выполнения алгоритма являются множества, содержащие в качестве элементов номера звеньев, заключенных между доступными для контроля точками.

Применение алгоритма проиллюстрировано на примере азимутального канала следящего электропривода антенного устройства радиотелескопа миллиметрового диапазона.

Общий вид радиотелескопа представлен на рисунке 3, на схеме обозначены: 1 – платформа (вторая масса); 2 – двигатели азимутального привода (первая масса); 3 –

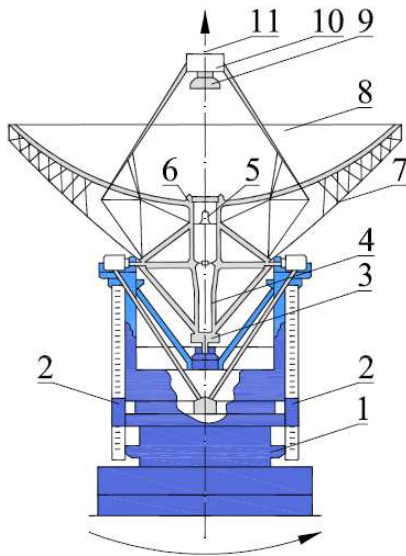


Рисунок 3 – Общий вид радиотелескопа

противовес (четвёртая масса); 4 – основание; 5 – облучатель; 6 – опорное кольцо; 7 – ферменный каркас; 8 – главное зеркало (третья масса); 9 – контррефлектор; 10 – ригель; 11 – азимутальная ось наведения антенного устройства.

В качестве математического описания электромеханической части объекта диагностирования рассматривается структурная схема, представленная на рисунке 4. Параметры звеньев (передаточные функции и статические нелинейности) соответствуют численным значениям системы управления радиотелескопа СМ214АУ с диаметром главного зеркала 70 метров.

Рассматриваемая структурная схема состоит из регулятора положения, регулятора скорости и объекта управления. Кроме того, для корректной работы системы необходимо наличие наблюдателя, идентифицирующего параметры

объекта управления и модального регулятора. Их влияние при диагностическом моделировании учитывалось как дополнительный вход системы.

Для оценки способности УФД к различению ошибок составлена таблица соответствия ошибок различным значениям индикаторов на основе множеств M_i (таблица 1). Индикаторы принимают значения 1, в случае если i -й диагностический наблюдатель чувствителен к ошибке рассматриваемого звена, и 0 в противном случае.

Полученная таблица характеризует достигнутую в результате решения задачи диагностирования глубину поиска. Из анализа таблицы следует, что удастся различить ошибки в звеньях 23, 24, 27, 28, 32; ошибки в группах {1, 2, 3, 4}, {5, 6, 31}, {7, 8}, {9, 10}, {11, 12, 13, 14}, {15, 16}, {17, 18}, {19, 20, 21, 22}, {25, 26}, {29, 30} остались неразличимы. Таким образом, построенное УФД позволяет различить 15 классов ошибок для ОД, состоящего из 32 звеньев.

В конце главы приведены результаты диагностического моделирования подтверждающие, что расчетная глубина локализации ошибок для рассматриваемого ОД действительно достигается. Повышение качества распознавания возможно при использовании методов идентификации или при использовании дополнительных контрольных точек, однако их назначение требует обоснования и выходит за рамки настоящего исследования.

Таблица 1

Таблица соответствия ошибок различным значениям индикаторов

| Класс | Индикатор | Звенья |
|-------|------------|-------------------------------|
| 1 | 1000000000 | $W_1 W_2 W_3 W_4$ |
| 2 | 0110000000 | $W_5 W_6 W_{31}$ |
| 3 | 0100000000 | $W_7 W_8$ |
| 4 | 0001000000 | $W_9 W_{10}$ |
| 5 | 0001000010 | $W_{11} W_{12} W_{13} W_{14}$ |
| 6 | 0010000000 | $W_{15} W_{16}$ |
| 7 | 0000100000 | $W_{17} W_{18}$ |
| 8 | 0000100010 | $W_{19} W_{20} W_{21} W_{22}$ |
| 9 | 0000010010 | W_{23} |
| 10 | 0000010000 | W_{24} |
| 11 | 0000000110 | $W_{25} W_{26}$ |
| 12 | 0000000100 | W_{27} |
| 13 | 0000001000 | W_{28} |
| 14 | 0000000010 | $W_{29} W_{30}$ |
| 15 | 0000000001 | W_{32} |

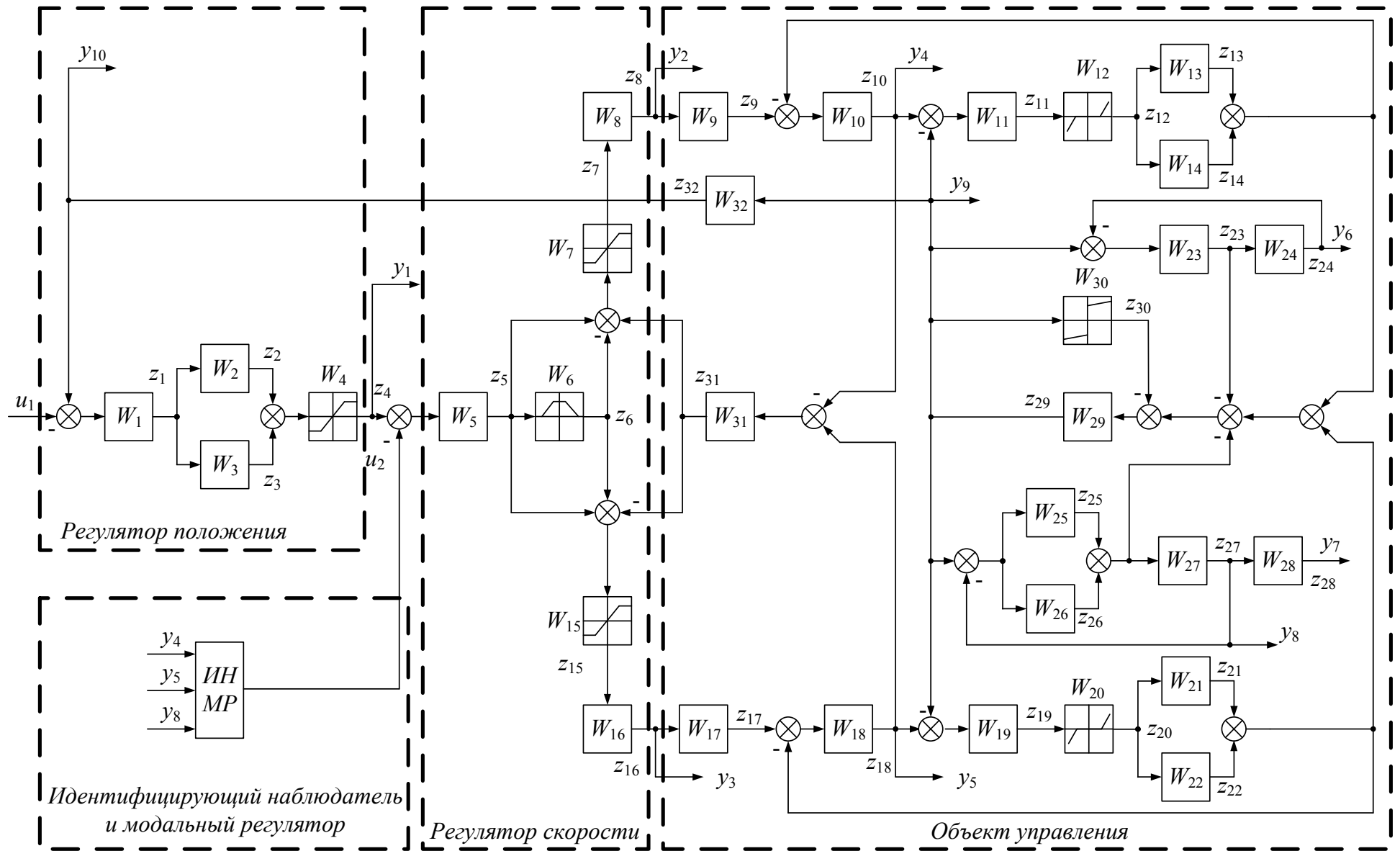


Рисунок 4 – Структурная схема следящего привода оси наведения главного зеркала по азимуту

В третьей главе проводится анализ влияния дестабилизирующих факторов на процесс диагностирования.

Наличие дестабилизирующих факторов, представленных в модели (1) слагаемым $K\rho(t)$, усложняет процедуру диагностирования за счет того, что невязки могут быть отличными от нуля и при отсутствии ошибок. Это может приводить как к пропуску ошибок, так и к ложным срабатываниям системы диагностирования.

После проведенного анализа соотношений следует, что для полной развязки невязки r от фактора ρ , когда дестабилизирующие факторы не будут влиять на сигнал невязки, требуется выполнить условие $TK = 0$, что накладывает определенные ограничения на выбор матрицы T и в ряде случаев приводит к невозможности построения наблюдателя.

Для преодоления этого недостатка приходится отказаться от полной развязки и прибегнуть к методам, позволяющим минимизировать степень влияния дестабилизирующих факторов.

Для реализации такой (частичной) развязки предлагается использовать подход, основанный на использовании сингулярного разложения матрицы K , представленной в виде $K = U_k \Sigma U_k^*$, где U_k и U_k^* – ортогональные матрицы,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \vdots \\ & \sigma_2 & & \vdots \\ & & \dots & \vdots \\ & & & 0 & \vdots \\ & & & & \vdots \\ & & & & & \sigma_g & \vdots \end{bmatrix}, 0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \dots \leq \sigma_g - \text{сингулярные числа матрицы } K,$$

упорядоченные по возрастанию. В этом случае квадрат нормы Фробениуса $\|TK\|_F^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_g^2$. Норма Фробениуса $\|A\|_F$ матрицы A определяется по формуле: $\|A\|_F = (\sum_i \sum_j A_{ij}^2)^{1/2} = (\text{tr}(AA^T))^{1/2}$.

В силу условия $0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \dots \leq \sigma_g$ первые g сингулярных чисел являются наименьшими, поэтому при использовании частичной развязки значение нормы произведения TK будет наименьшим для выбранного g . Нетрудно видеть, что в случае полной развязки $\|TK\|_F = 0$.

Поскольку в предлагаемом подходе матрица T для рассматриваемого диагностического наблюдателя определяется фактически однозначно и не зависит от матрицы K , квадрат нормы $\|TK\|_F^2$ может превосходить сумму квадратов g первых сингулярных чисел.

Отдельно взятый диагностический наблюдатель, построенный по предложенной выше методике, не может обеспечить достаточно низкую чувствительность к дестабилизирующим факторам, поэтому для генерации сигнала невязки предлагается использовать совместную работу нескольких УФД.

Совместная работа двух диагностических наблюдателей проиллюстрирована на рисунке 5, где матрицы-строки R_1 и R_2 были найдены в процессе построения наблюдателей, a_1 и a_2 – весовые коэффициенты, подлежащие определению.

Вклад фактора ρ в невязку r определим следующим образом

$$\varepsilon_\rho = \left\| a_1 T^{(1)} K + a_2 T^{(2)} K \right\|_F^2, \quad (7)$$

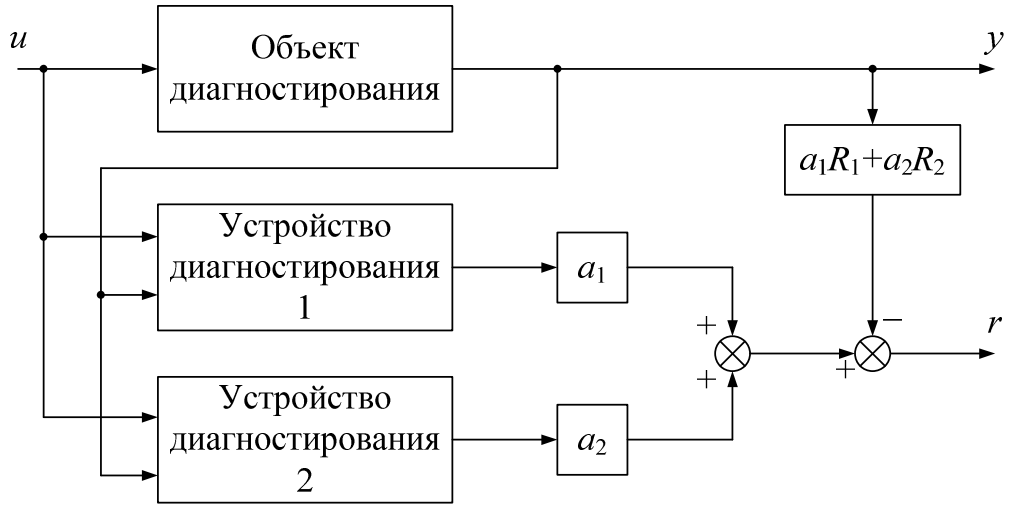


Рисунок 5 – Совместная работа двух диагностических наблюдателей для генерации невязки

где $T^{(1)}$ и $T^{(2)}$ - матрицы для первого и второго УФД. После использования формулы определения нормы Фробениуса и введения новых обозначений выражение (7) может быть представлено в виде

$$\boldsymbol{\varepsilon}_\rho = a_1^2 s_1 + 2a_1 a_2 s_{12} + a_2^2 s_2,$$

$$\text{где } s_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q (T^{(1)} K)^2 = \|T^{(1)} K\|_F^2, \quad s_2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q (T^{(2)} K)^2 = \|T^{(2)} K\|_F^2, \\ s_{12} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q ((T^{(1)} K)(T^{(2)} K)).$$

Конструктивный результат получен с учетом вклада $\boldsymbol{\varepsilon}_f$ ошибки в невязку r , его оценка учтена как $\boldsymbol{\varepsilon}_f = a_1^2 + a_2^2$.

Таким образом, решение поставленной проблемы приводит к необходимости решения следующих задач оптимизации:

– максимизации вклада $\boldsymbol{\varepsilon}_f$ ошибки в невязку r : $a_1^2 + a_2^2 \rightarrow \max$ при наложении ограничения на вклад $\boldsymbol{\varepsilon}_\rho$: $a_1^2 s_1 + 2a_1 a_2 s_{12} + a_2^2 s_2 \leq \sigma$.

– минимизации вклада $\boldsymbol{\varepsilon}_\rho$: $a_1^2 s_1 + 2a_1 a_2 s_{12} + a_2^2 s_2 \rightarrow \min$ при ограничении на вклад ошибки $\boldsymbol{\varepsilon}_f$: $a_1^2 + a_2^2 \geq \sigma$.

Здесь σ – некоторая постоянная, величина которой выбирается исходя из величин сингулярных чисел $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_g$. Так, в случае максимизации вклада $\boldsymbol{\varepsilon}_f$ ошибки в невязку $\sigma = \sigma_{\min}$, где σ_{\min} – минимальное из сингулярных чисел, а при минимизации вклада $\boldsymbol{\varepsilon}_\rho$ принять $\sigma = \sigma_{\max}$, где σ_{\max} – максимальное из сингулярных чисел матрицы K .

Эти задачи решены методом множителей Лагранжа путем перехода к задаче безусловной оптимизации, целевые функции при этом имеют вид:

$$\Phi(a_1, a_2) = a_1^2 + a_2^2 + \lambda(a_1^2 s_1 + 2a_1 a_2 s_{12} + a_2^2 s_2 - \sigma) \rightarrow \max, \quad (8)$$

$$\Phi(a_1, a_2) = a_1^2 s_1 + 2a_1 a_2 s_{12} + a_2^2 s_2 + \lambda(a_1^2 + a_2^2 - \sigma) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа.

Результатом решения задачи максимизации целевой функции (8), являются следующие выражения, для $\lambda_1 = -\frac{1}{2} \frac{s_1 + s_2 - ((s_1 - s_2)^2 + 4s_{12}^2)^{1/2}}{s_1 s_2 - s_{12}^2}$ коэффициенты a_1 и a_2 :

$$a_2 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (\alpha^3 (s_1 s_2 - s_{12}^2) (s_1 (\alpha + s_2 - s_1) - 2s_{12}^2))^{1/2}}{2 \alpha^2 (s_1 s_2 - s_{12}^2)},$$

$$a_1 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (s_2 (s_1 - s_2 + \alpha) - 2s_{12}^2) (\alpha^3 (s_1 s_2 - s_{12}^2) (s_1 (s_2 - s_1 + \alpha) - 2s_{12}^2))^{1/2}}{2 s_{12} \alpha^2 (s_1 s_2 - s_{12}^2) (s_1 + s_2 - \alpha)}.$$

Для второго корня $\lambda_2 = -\frac{1}{2} \frac{s_1 + s_2 + ((s_1 - s_2)^2 + 4s_{12}^2)^{1/2}}{s_1 s_2 - s_{12}^2}$ весовые коэффициенты определяются следующим образом:

$$a_2 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (\alpha^3 (s_1 s_2 - s_{12}^2) (s_1 (\alpha + s_1 - s_2) + 2s_{12}^2))^{1/2}}{2 \alpha^2 (s_1 s_2 - s_{12}^2)},$$

$$a_1 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (s_2 (s_2 - s_1 + \alpha) + 2s_{12}^2) (\alpha^3 (s_1 s_2 - s_{12}^2) (s_1 (s_1 - s_2 + \alpha) + 2s_{12}^2))^{1/2}}{2 s_{12} \alpha^2 (s_1 s_2 - s_{12}^2) (s_1 + s_2 + \alpha)},$$

где $\alpha = ((s_1 - s_2)^2 + 4s_{12}^2)^{1/2}$.

В результате решения задачи минимизации целевой функции (9), получены следующие выражения, для первого корня $\lambda_1 = -\frac{1}{2} (s_1 + s_2 - ((s_1 - s_2)^2 + 4s_{12}^2)^{1/2})$ выражения для коэффициентов a_1 и a_2 :

$$a_2 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (\alpha^3 (\alpha + s_1 - s_2))^{1/2}}{2 \alpha^2}, \quad a_1 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (\alpha^3 (\alpha + s_1 - s_2))^{1/2}}{4 \alpha^2} \frac{(s_1 - s_2 - \alpha)}{s_{12}}.$$

Расчет для второго корня $\lambda_2 = -\frac{1}{2} (s_1 + s_2 + ((s_1 - s_2)^2 + 4s_{12}^2)^{1/2})$ приводит к следующему результату:

$$a_2 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (\alpha^3 (\alpha + s_2 - s_1))^{1/2}}{2 \alpha^2}, \quad a_1 = \pm \frac{(2\sigma^{1/2}) (\alpha^3 (\alpha + s_2 - s_1))^{1/2}}{4 \alpha^2} \frac{(s_1 - s_2 + \alpha)}{s_{12}},$$

где, как и в предыдущем случае, $\alpha = ((s_1 - s_2)^2 + 4s_{12}^2)^{1/2}$.

Решение задачи минимизации влияния дестабилизирующих факторов при диагностировании проведено на примере следящего электропривода антенного устройства радиотелескопа миллиметрового диапазона.

Результаты расчета весовых коэффициентов с помощью пакета *Matlab* представлены в таблице 2.

Сравнивая между собой коэффициенты, рассчитанные при решении рассмотренных задач оптимизации, следует отметить, что они отличаются только на некоторую постоянную величину и могут быть использованы для взаимной проверки результатов.

Результаты расчета весовых коэффициентов

| УФД | | Исходные данные для расчета | | | Весовые коэффициенты, при $\varepsilon_f \rightarrow \max$ | | Весовые коэффициенты, при $\varepsilon_p \rightarrow \min$ | |
|-----|-----|-----------------------------|-------|-----------|--|-------|--|-------|
| i | j | s_i | s_j | $s_{i,j}$ | a_1 | a_2 | a_1 | a_2 |
| 1 | 4 | 0,90 | 81 | 8,55 | 0,11 | -0,01 | 3,55 | -0,38 |
| 1 | 5 | 0,90 | 81 | 8,55 | 0,11 | -0,01 | 3,55 | -0,38 |
| 1 | 6 | 0,90 | 0,56 | 0,71 | 0,50 | -0,63 | 2,21 | -2,80 |
| 1 | 8 | 0,90 | 9 | 2,85 | 0,30 | -0,09 | 3,40 | -1,08 |
| 1 | 9 | 0,90 | 9 | 2,85 | 0,30 | -0,09 | 3,40 | -1,08 |
| 4 | 5 | 81 | 81 | 81 | 0,05 | -0,05 | 2,52 | -2,52 |
| 4 | 6 | 81 | 0,56 | 6,75 | 0,01 | -0,11 | 0,30 | -3,56 |
| 4 | 8 | 81 | 9 | 27 | 0,03 | -0,1 | 1,13 | -3,38 |
| 4 | 9 | 81 | 9 | 27 | 0,03 | -0,1 | 1,13 | -3,38 |
| 5 | 6 | 81 | 0,56 | 6,75 | 0,01 | -0,11 | 0,30 | -3,56 |
| 5 | 8 | 81 | 9 | 27 | 0,03 | -0,1 | 1,13 | -3,38 |
| 5 | 9 | 81 | 9 | 27 | 0,03 | -0,1 | 1,13 | -3,38 |
| 6 | 8 | 0,56 | 9 | 2,25 | 0,31 | -0,08 | 3,46 | -0,87 |
| 6 | 9 | 0,56 | 9 | 2,25 | 0,31 | -0,08 | 3,46 | -0,87 |
| 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0,16 | -0,16 | 2,52 | -2,52 |

При решении задачи минимизации влияния дестабилизирующих факторов важным аспектом стало сохранение качества локализации ошибок. Так же, как и для случая раздельного использования наблюдателей (таблица 1) достигнутое качество локализации оценивалось при помощи таблицы соответствия ошибок различным значениям индикаторов (таблица 3).

По результату сравнения состава таблиц 1 и 3, сделан вывод, что при принятом способе генерации невязок способность УФД к различению ошибок сохраняется в полном объеме.

В заключении главы приведены результаты диагностического моделирования с использованием рассчитанных коэффициентов минимизации.

Таблица 3

Таблица соответствия ошибок различным значениям индикаторов

| Класс ошибок | Индикатор | Звенья |
|--------------|---------------------|-------------------------------|
| 1 | 000011111000000000 | $W_1 W_2 W_3 W_4$ |
| 2 | 110000000000000000 | $W_5 W_6 W_{31}$ |
| 3 | 100000000000000000 | $W_7 W_8$ |
| 4 | 000010000111100000 | $W_9 W_{10}$ |
| 5 | 0000100011111001011 | $W_{11} W_{12} W_{13} W_{14}$ |
| 6 | 010000000000000000 | $W_{15} W_{16}$ |
| 7 | 0000010001000111000 | $W_{17} W_{18}$ |
| 8 | 0000010011001111000 | $W_{19} W_{20} W_{21} W_{22}$ |
| 9 | 0000001010101101111 | W_{23} |
| 10 | 0000001000100100110 | W_{24} |
| 11 | 0000000110011011111 | $W_{25} W_{26}$ |
| 12 | 0000000100010010101 | W_{27} |
| 13 | 0010000000000000000 | W_{28} |
| 14 | 0000000010001001011 | $W_{29} W_{30}$ |
| 15 | 0001000000000000000 | W_{32} |

Четвертая глава содержит решение задачи построения управления с компенсацией ошибок, при котором обеспечивается полная развязка от воздействий, вызываемых этими ошибками, причем предварительное оценивание их величины не предполагается. Такой подход целесообразен в тех случаях, когда оценивание величины ошибок по тем или иным причинам не представляется возможным или нецелесообразно.

Схема организации поиска и локализации ошибок представлена на рисунке 6, где система Σ_f^* описывает диагностические наблюдатели, чувствительные к возникшей ошибке, Σ_0^* – инвариантные к ней. Устройство принятия решения выдает значение «1» при превышении значения сигнала невязки некоторого установленного допуска, «0» – в противном случае.

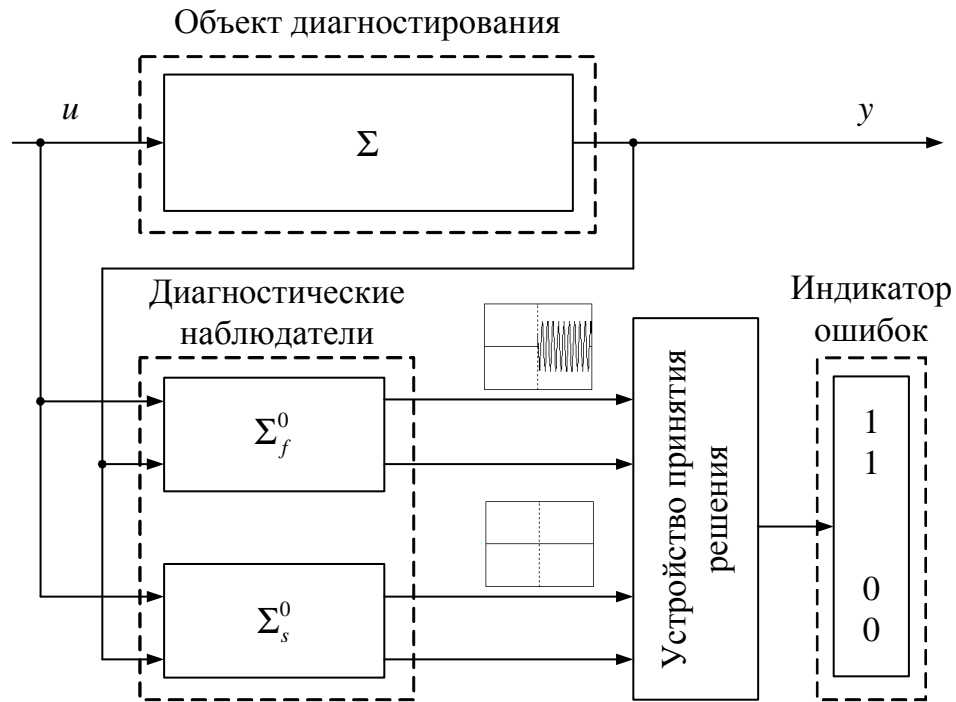


Рисунок 6 – Схема проведения поиска и локализации ошибок

Поскольку при возникновении ошибки поведение системы становится неопределенным, решение задачи управления на основе модели (1) становится невозможным.

Для решения задачи управления при наличии ошибки вектор управления $u(p)$ формируется в виде

$$u(p) = V_1(p)z_0(p) + V_2(p)y(p) + V_3(p)u_s(p) \quad (10)$$

для некоторых матриц V_1, V_2, V_3 , где u_s – новый вектор управления размера m ; z_0 (размера $q, q \leq n$) – вектор состояния вспомогательной системы, Σ_0 , подлежащей определению и описываемой уравнением.

$$z_0(p) = F_0(p)z_0(p) + G_0u(p) + S_0(p)y(p). \quad (11)$$

Модель (11) будет одинаковой для рассматриваемой группы ошибок.

Описание системы Σ_s задается моделью

$$z_s(p) = F_s(p)z_s(p) + G_su_s(p) \quad (12)$$

с вектором состояния z_s размера $v, v \leq q$. В то время как модель системы Σ_s не содержит определенные компоненты вектора ϑ , отвечающие за учет влияния рассматриваемых

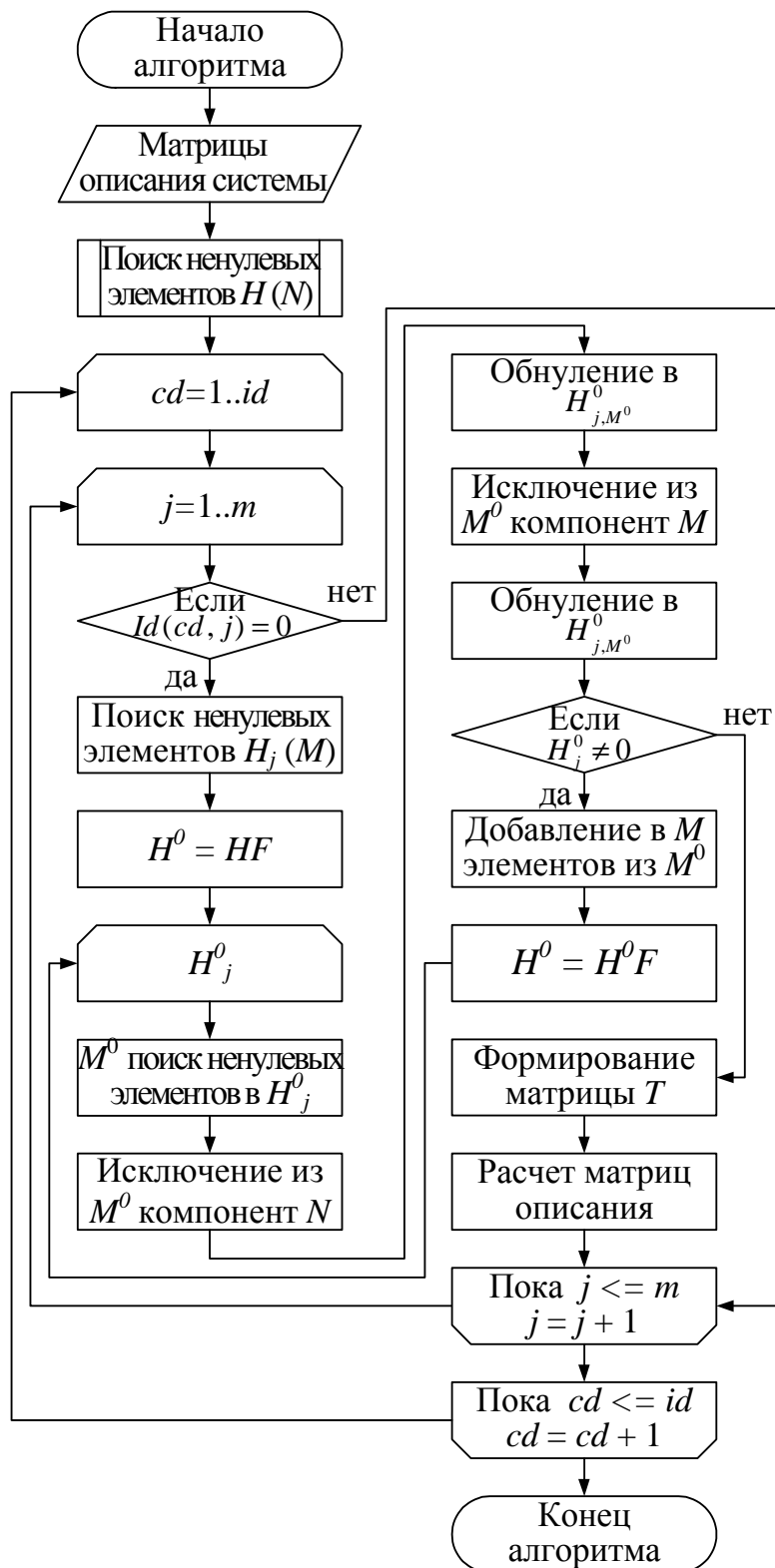


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма

содержит элементы признанные неисправными по результатам диагностирования. На основе этой системы строятся законы управления для каждого случая присутствия ошибок. Материал главы проиллюстрирован примером построения управления с компенсацией ошибок для азимутального канала следящего электропривода антенного устрой-

мого класса ошибок на модель ОД, описание системы Σ_f включает в себя эти компоненты.

Если закон (10) существует и ошибка возникла и обнаружена, то решение проблемы управления реализуется на основе модели (12), которая не содержит ошибок, после чего от найденного управления $u_s(p)$ по формуле (11) осуществляется переход к управлению $u(p)$; в результате достигается эффект компенсации к группе ошибок.

Для получения описания системы Σ_0 предложен алгоритм, блок-схема которого приведена на рисунке 7. Существенным отличием является то что, если в главе 2 решалась задача поиска описания части системы, чувствительной к возникающей ошибке, то для построения управления с компенсацией ошибок (УКО) необходимо найти описание части системы, инвариантной к возникшей ошибке.

Описанная выше процедура построения УКО носит достаточно общий характер и подходит не только для радиотехнических систем, но и может быть использована при диагностировании систем автоматического управления, заданных в виде структурных схем.

В рамках главы приведен алгоритм построения вспомогательной системы, которая не

ства радиотелескопа миллиметрового диапазона. По результатам расчетов проведено диагностическое моделирование.

В заключении приведены основные теоретические и практические результаты диссертационной работы и намечены дальнейшие пути исследования. Эти результаты состоят в следующем:

1. Показано, что известное матричное описание систем в пространстве состояний можно эффективно использовать для решения задач функционального диагностирования и в случае их задания структурными схемами, состоящими из звеньев вида «один вход – один выход».
2. Разработан алгоритм построения устройств диагностирования как линейных, так и содержащих статические нелинейности систем, заданных структурными схемами. Алгоритм доведён до программной реализации.
3. Проведен анализ влияния дестабилизирующих факторов на процесс диагностирования линейных и нелинейных систем и предложена процедура минимизации их влияния путём использования совместной работы наблюдателей.
4. Предложен алгоритм решения задачи построения управления с компенсацией ошибок, как для линейных, так и для содержащих статические нелинейности систем, заданных в виде структурных схем.
5. Получены программные реализации предложенных алгоритмов, проведено моделирование системы функционального диагностирования, парирующей влияние дестабилизирующих факторов, и управления с компенсацией ошибки для азимутального канала радиотелескопа. Для моделирования использовался программный пакет Matlab+Simulink фирмы MathWork, Inc., его результат подтвердил теоретические положения исследования.

Область приложения предложенных алгоритмов может быть существенно расширена за счет рассмотрения систем, структурные схемы которых содержат элементы с векторными входами и выходами. Другим направлением совершенствования методов, приведенных в диссертационном исследовании, являются разработки, нацеленные на снижение избыточности предложенных методов.

Соответствующие исследования могут быть продолжены на кафедре «Радиотехнические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им В.И. Ульянова (Ленина)» и на базе акционерного общества «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Якшин, А.С. Функциональное диагностирование узлов радиосистем со статическими нелинейностями / Б.П.Подкопаев, А.С.Якшин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 2. С. 16-23.
2. Якшин, А.С. Решение задачи диагностирования датчиков системы управления обитаемым подводным аппаратом / А.Н.Жиравок, А.С.Якшин // Мехатроника, автоматизация, управление. Том 16, № 11, 2015. С. 777-782.
3. Якшин, А.С. Решение задачи аккомодации к дефектам технических систем, заданных структурными схемами / А.Н.Жиравок, А.С.Якшин // Мехатроника, автоматизация, управление. № 5, 2010. С. 42-48.

4. Якшин, А.С. Диагностирование датчиков технических систем/ А.Н.Жиравок, А. М.Писарец, А.С.Якшин // *Sensors & Systems*. – №8. – 2007. – С. 12-17.
5. Якшин, А.С. Диагностирование технических систем, заданных структурными схемами с нелинейными звеньями / А.Н.Жиравок, А.С.Якшин // *Мехатроника, автоматизация, управление*. № 9, 2006. С. 36-44.

Прочие издания:

6. Якшин, А.С. Учет динамических свойств датчиков при диагностировании /А.Н.Жиравок, А.С.Якшин // Научная конференция ДВГТУ «Вологдинские чтения». Материалы докладов. – Владивосток, Изд-во ДВГТУ, 2007. С. 4.
7. Якшин, А.С. Об одном подходе к диагностированию нелинейных систем /А.Н.Жиравок, А.С.Якшин // Научная конференция ДВГТУ «Вологдинские чтения». Материалы докладов. – Владивосток, Изд-во ДВГТУ, 2006. С. 12-14.
8. Якшин, А.С. Структурный подход к диагностированию объектов, заданных структурными схемами, содержащими нелинейные звенья / А.Н.Жиравок, А.С.Якшин // Сборник трудов ДВО РИА. Вып. 11. Владивосток: ДВГТУ, 2005. С. 113 – 117.
9. Якшин, А.С. Структурный подход к построению средств диагностирования, чувствительных к дефектам заданных подсистем / А.С. Якшин // Научная конференция ДВГТУ «Вологдинские чтения». Материалы докладов. – Владивосток, Изд-во ДВГТУ, 2005. С. 67-68.
10. Якшин, А.С. Диагностирование систем, заданных звеньями, содержащими передаточные функции и статические нелинейности / Е.В.Богатырев, А.Н.Жиравок, А.С.Якшин // Сборник трудов ДВО РИА – Владивосток: ДВГТУ. – 2004 – Вып. 9 – С. 92 – 97.
11. Якшин, А.С. Обоснование вида устройства диагностирования для контроля систем, заданных структурными схемами со статическими нелинейностями / А.С. Якшин // Научная конференция ДВГТУ «Вологдинские чтения». Материалы докладов. – Владивосток, Изд-во ДВГТУ, 2004. С. 45-47.
12. Якшин, А.С. Разработка средств диагностирования систем, заданных передаточными функциями и статическими нелинейностями / А.С. Якшин // Региональная научно-техническая конференция ДВГТУ «Молодежь и научно-технический прогресс». Сборник докладов, II часть. – Владивосток, Изд-во ДВГТУ, 2004. С. 105-106.
13. Yakshin, A. S. Fault accommodation in systems described by structural schemes / Aleksey N. Zhirabok, Alexander S. Yakshin, Evgeny Y. Bobko // *IASTED International Conference Signal Processing, Pattern Recognition and Applications (SPPRA 2012)*, 2012 Crete, Greece, DOI: 10.2316/P.2012.778-037
14. Yakshin, A. Robust methods for diagnosis in systems with nonlinear links / V. Filarctov, A.Zhirabok, A.Yakshin // *The 21st Int. DAAAM symp. V.21, Austria, 2010*, pp. 0333-0334, ISSN 1726-9679.
15. Yakshin, A. S. Binary vector algebra for structural approach to diagnosis /A.N.Zhirabok, S.A.Zhukova, A.S.Yakshin // *Pacific Science review A: Natural Science and Engineering*. 2008. V.10. №3.pp.268-273.

16. Yakshin, A. Structure approach for diagnosis of systems described by schemes with nonlinear links / A.Yakshin // Sixth International Young Scholars' Forum of the Asia-Pacific Region Countries. Proceedings. Part II., Vladivostok, Russia, 2005, pp. 4-5.
17. Yakshin, A. Linear methods for diagnosis of systems with nonlinear links / A.Yakshin, A.Zhirabok // The 16th Int. DAAAM symp. Croatia, 2005, pp. 393-394, ISSN 1726-9679.
18. Yakshin, A. Diagnosis of systems described by blocks with transfer functions and static nonlinearities / A.Zhirabok, Y.Bogatyrev, A.Yakshin // Proc. 10th IEEE Int. Conf. MMAR-2004. Poland, Miedzydroje, August 30-September 2, 2004. P. 1345-1348.