

УДК 681.518.22

## СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ИНВАРИАНТНЫХ К ОШИБКАМ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА ВЫХОДА ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

*Игорь Сергеевич КИКИН, к. т. н.*

*ФАО «Государственный научно исследовательский институт авиационных систем»  
ГНЦ РФ*

*E-mail: kikin@gosniias.ru*

*Представлены новые положения теории инвариантности систем автоматического управления к ошибкам измерения вектора выхода объекта управления. На базе сформулированных условий инвариантности разработана методология повышения точности систем автоматического управления летательными аппаратами с применением предлагаемой специальной технологии моделирования процесса управления в режиме нормального функционирования объекта управления.*

*Ключевые слова: имитационный метод оценивания, идентификация факторов неопределенности, модель возмущений, эквивалентное возмущение, мгновенное апостериорное оценивание, автономная коррекция.*

## STRUCTURAL-ALGORITHMIC METHODS FOR SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS INVARIANT TO ERRORS IN MEASURING THE OUTPUT VECTOR OF THE CONTROL OBJECT

*Igor S. KIKIN, PhD in Engineering*

*'State Scientific Research Institute of Aviation Systems'*

*State Scientific Center of Russian Federation*

*E-mail: kikin@gosniias.ru*

*The article presents new provisions of the theory of automatic control systems invariance to errors in measuring the output vector of the control object. On the basis of formulated invariance conditions, a methodology has been developed to improve the accuracy of automatic flight control systems using the proposed special technology for modeling the control process of the control object in normal operation mode.*

*Keywords: simulation evaluation method, uncertainty factors identification, disturbance model, equivalent disturbance, instantaneous posterior estimation, autonomous correction.*

## 1. Введение

Одним из эффективных способов повышения точности систем автоматического управления (САУ) является использование методов теории инвариантности. Система управления инвариантна по отношению к внешним воздействиям, если после завершения переходного процесса, определяемого начальными условиями, ошибка САУ не зависит от внешних воздействий.

Воздействия на объект управления (ОУ), кроме управляющих, принято называть **возмущениями**. Возмущения, могут быть разделены на внешние, обусловленные состоянием среды функционирования ОУ, и внутренние (параметрические), обусловленные отклонением значений параметров ОУ от расчетных. Возмущения следует отнести к классу физических воздействий, поскольку их влияние на движение ОУ оценивается непосредственно с использованием физических законов движения. Для подвижного ОУ возмущения приводятся к воздействию на него возмущающих сил и моментов сил. Минимизация их влияния на движение ОУ требует аналогичных по физической природе компенсирующих воздействий.

Воздействия на измерительные системы САУ, приводящие к погрешностям измерений, принято называть **помехами**. Помехи по источникам воздействия также разделяются на внешние и внутренние. Внешние помехи могут быть связаны как с организованным противодействием, так и с естественными флуктуациями регистрируемых информационных полей. Внутренние помехи связаны с технологическими погрешностями изготовления измерителей-преобразователей. Помехи следует отнести к информационным воздействиям, влияющим на движение ОУ опосредованно, при формировании управляющих воздействий. Теоретически можно не допустить преобразования информационных воздействий в физические, автономно решая задачу повышения точности измерений, которые применяются для оценивания состояния ОУ. Современная теория управления базируется именно на таком подходе к проектированию САУ: разделение задач динамического проектирования и разработки системы информационного обеспечения процесса управления. Процесс проектирования САУ с применением так называемой **теоремы разделения** [1] ограничивает достижимый уровень показателей технической эффективности САУ. Работы по количественной оценке этих ограничений практически не проводятся.

Прежде чем более подробно проанализировать состояние теории инвариантности, отметим широкое применение на практике методов фильтрации сигналов. Процессы выделения полезного сигнала из его смеси с помехой, базирующиеся на различии частотных характеристик

полезного сигнала и помехи, во многих прикладных задачах называют частотной селекцией. В приемниках модулированных сигналов частотная селекция низкочастотного сигнала от внешних помех обеспечивается применением известного закона изменения несущей частоты. Для помех измерений, частоты которых превышают частоты полезного сигнала, применяют название «шум измерений», который подавляется фильтром нижних частот. Замкнутую САУ подвижным объектом можно также рассматривать как фильтр нижних частот, который не пропускает физических воздействий на ОУ, частотный диапазон которых находится вне полосы пропускания САУ.

Погрешности автономных датчиков обратных связей САУ содержат компоненты, частотный диапазон которых соответствует частотному диапазону полезного входного сигнала. Указанные компоненты обрабатываются контурами САУ аналогично входным воздействиям и приводят к соответствующему отклонению фактических координат состояния ОУ от заданных. Эти отклонения (инструментальные погрешности САУ) при оценивании состояния ЛА с применением инерциальных измерителей и датчиков системы воздушных сигналов существенно превышают динамические погрешности САУ и фактически определяют ее точность.

Основные идеи создания абсолютно инвариантных относительно возмущающих воздействий систем и систем с инвариантностью до  $\varepsilon$ , а также условия их физической реализуемости первоначально были высказаны и нашли применение в теории автоматического управления. Решение проблемы компенсации возмущающих воздействий базируется на принципе двухканальности, сформулированном академиком Б. Н. Петровым [2]. В его основе лежит идея о необходимости «симметричной» по двум каналам передачи в систему возмущающих воздействий для компенсации их влияния на результат управления. В рамках теории автоматического управления разработаны следующие структуры САУ, инвариантные к влиянию возмущений:

- **Комбинированная система управления по задающему воздействию**, в которой наряду с сигналом ошибки во внутреннюю цепь системы вводится сигнал от задающего воздействия с помощью компенсирующего устройства по задающему воздействию.
- **Комбинированная система управления по возмущающему воздействию**, в которой наряду с управлением по отклонению используется управление (компенсирующая связь разомкнутого типа) по возмущающему воздействию.

Практическая реализация комбинированных САУ по возмущающему воздействию ограничивается необходимостью непрерывного измерения величины возмущения. При этом следует также иметь в виду

зависимость точности реализации компенсирующих связей от точности указанных дополнительных измерений. Развитие теории идентификации и адаптивного управления существенно расширило возможности построения инвариантных структур САУ за счет реализации принципа внутренней модели в задачах компенсации возмущений [3, 4]. За счет построения генератора возмущений, заменяющего дополнительные измерения, удалось расширить номенклатуру систем с инвариантностью до  $\varepsilon$ .

В силу актуальности проблемы повышения точности измерительных систем, теория инвариантности была распространена и эффективно использована для указанных систем [5]. Принцип двухканальности оказался весьма продуктивен и для решения проблемы компенсации ошибок преобразования и чувствительности измерительных устройств, в том числе связанных с нестабильностью питания [6–8].

Задача обеспечения инвариантности САУ к ошибкам измерений алгоритмическими методами, без дополнительных измерений, практически еще не формулировалась в процессе развития теории инвариантности. Следует акцентировать внимание на принципиальном отличии этой задачи от задачи повышения точности измерений с применением теории инвариантности. Корректная постановка задачи инвариантности к ошибкам измерений может формулироваться только для модели САУ, в составе которой применяется устройство управления, которое представляет собой информационно-управляющую систему (ИУС) с информационными возмущающими входами, соответствующими ошибкам измерений (помехам). При этом физические возмущения соответствуют возмущающим входам ОУ. Этот вариант системного подхода к проектированию САУ иллюстрируется на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная структура САУ  
 $W$  — вектор возмущений,  $\xi$  — вектор помех

Для некоторых классов САУ реализована компенсация ошибок измерений с использованием дополнительной информационной системы, которая играет роль измерителя компенсируемых погрешностей. Иными словами, к погрешностям измерений может применяться классический подход теории инвариантности, основанный на дополнительных, фактически эталонных измерениях, определяющих указанные погрешности. Характерный пример практической реализации такого подхода к построению САУ — коррекция системы инерциальной навигации подвижного объекта от спутниковой радионавигационной системы.

Основным недостатком систем инерциальной навигации и управления является накопление ошибок счисления навигационных элементов объекта. Из-за накопления ошибок автономное применение таких систем ограничено по времени функционирования. Применение внешних систем коррекции, позволяющих скомпенсировать ошибки измерений, приводит, как правило, к ухудшению стоимостных и эксплуатационных характеристик, а также к снижению помехозащищенности САУ.

В данной работе представлены новые положения теории инвариантности САУ, относящиеся к проблеме автономной коррекции (самокоррекции) ошибок измерений, частотный диапазон которых соответствует частотному диапазону полезного сигнала. Указанные положения дают теоретическое обоснование алгоритмических методов формирования оценок состояния ОУ, инвариантных к ошибкам измерений. Эти методы не требуют дополнительных измерений.

### *Постановка задачи*

**Цель исследования:** формирование системной методологии автономной коррекции ошибок измерений параметров процесса управления динамическим объектом.

### **Задачи исследования.**

- 1) Формирование принципа обработки информации о процессе управления, обеспечивающего инвариантность САУ к ошибкам измерений вектора выходных переменных ОУ.
- 2) Формирование общего алгоритма поиска решения в виде системы процессов, включающей в себя идентификацию факторов априорной неопределенности процесса управления, которая обеспечивает инвариантность оценок состояния ОУ к ошибкам измерений.
- 3) Разработка структуры модели САУ, которая в режиме нормального функционирования ОУ обеспечивает реализацию процесса автономной коррекции ошибок измерений.

## 2. Имитационный метод оценивания состояния объекта управления

Характерный признак современных САУ — использование в их структуре математических моделей ОУ и других подсистем, обеспечивающих имитацию рабочих процессов САУ. Формирование адекватной математической модели движения ОУ в процессе оперативной идентификации обеспечивает эффективное функционирование адаптивных САУ.

При синтезе САУ обычно приходится решать задачу оценивания (восстановления) вектора состояния динамических систем  $x(t) \in R^n$  с использованием  $m$ -мерных зашумленных измерений, которые можно представить в виде вектора  $z(t) = \Phi(x(t), \eta) + \varepsilon(t)$ , где  $\Phi$  — известная в общем случае нелинейная вектор-функция своих аргументов,  $\eta$  — вектор неизвестных параметров,  $\varepsilon \in R^m$  — погрешности измерения.

В рамках детерминированного подхода для алгоритмов оценивания обычно используется термин **наблюдатель**, а в рамках статистического подхода — **фильтр или устройство оценивания**.

Наблюдатели реализуют возможность восстановления недоступных для измерения переменных состояния ОУ, исключают необходимость установки дополнительных датчиков и таким образом обеспечивают улучшение эксплуатационных и стоимостных характеристик САУ. Функциональная схема САУ с динамическим наблюдателем состояния на базе явной математической модели ОУ [9] представлена на рис. 2, где приняты следующие обозначения:  $y, z$  — векторы состояния и измеряемого выхода ОУ,  $y_M, z_M$  — векторы состояния и измеряемого выхода модели ОУ,  $u$  — вектор управления,  $D$  — матрица наблюдения,  $\xi_z$  — вектор ошибок измерения выхода ОУ,  $L$  — матрица корректирующих коэффициентов.

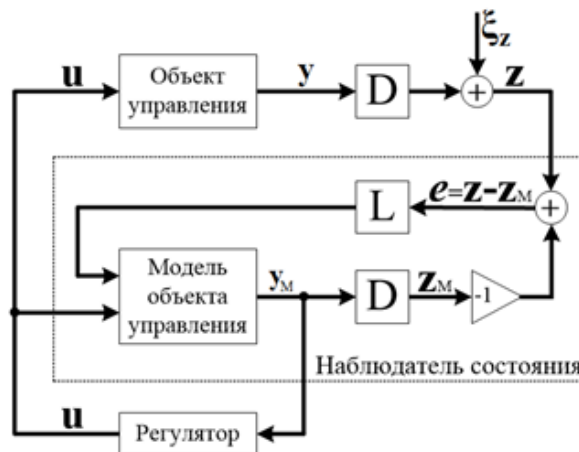


Рис. 2. Функциональная схема САУ с наблюдателем состояния ОУ

Структура наблюдателя состояния полного порядка соответствует структуре фильтра Калмана. Это позволяет осуществить фильтрацию (в том числе и оптимальную) выходных переменных при наличии шумов в каналах измерения, выбрав оптимальным образом корректирующие воздействия наблюдателя [9]. Здесь речь может идти только о фильтрации помех измерений, у которых диапазон частот отличается от диапазона частот полезного сигнала. Компенсация погрешностей измерений в диапазоне частот полезного сигнала с использованием фильтра Калмана требует дополнительных измерений и соответствующего повышения его размерности, а также размерности оцениваемого вектора состояния. Таким образом, схема, представленная на рис. 2, отображает некоторую унифицированную структуру системы оценивания состояния ОУ.

При полной априорной информации об условиях реализации стационарного процесса управления оператор ОУ отображается векторным дифференциальным уравнением в форме Коши вида [1]:

$$\frac{dy}{dt} = \mathbf{f}(y, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где  $y \in R^n$  — вектор состояния ОУ,  $\mathbf{u} \in R^r$  — вектор управления,  $\mathbf{f}$  — векторная функция, непрерывная и непрерывно дифференцируемая по совокупности аргументов, удовлетворяющая условиям существования и единственности решения задачи Коши. В этих условиях обратная связь по состоянию ОУ может быть заменена обратной связью по состоянию его модели, как показано на рис. 3, где индекс «М» обозначает переменные модели ОУ,  $y_{IN}$  — векторный вход САУ,  $e_y$  — векторный сигнал рассогласования,  $\dot{y}_M = \frac{dy_M}{dt}$ ,  $y_M(0)$  — начальное значение вектора состояния модели ОУ. В рассматриваемых условиях реализации процесса управления  $y_M(0) = y(0)$ , где  $y(0)$  — начальное значение вектора состояния ОУ.



Рис. 3. Функциональная структура САУ с моделью ОУ

Физические законы механического движения — дифференциальные уравнения второго порядка. В обобщенной векторной форме состояние подвижного объекта определяется уравнением:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{F}$  — векторная функция, удовлетворяющая условиям существования и единственности решения задачи Коши;  $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$  — вектора позиционных координат и скорости ОУ. Функциональная схема САУ с моделью ОУ второго порядка представлена на рис. 4.



Рис. 4. Функциональная структура САУ с моделью ОУ второго порядка

Оценивание вектора состояния ОУ в результате моделирования процесса управления с использованием детерминированной модели ОУ будем называть **имитационным методом оценивания состояния ОУ (ИМО)**. Как показано на рисунках 3 и 4, в режиме имитационного оценивания состояния ОУ система замкнута по выходам имитатора ОУ, а управление реальным ОУ осуществляется в разомкнутом режиме регулятором, на вход которого подается реальный входной сигнал и имитируемые сигналы обратных связей. При этом не требуется датчиков, реализующих обратную связь по выходу или состоянию ОУ.

В представленных идеализированных вариантах САУ влияние ошибок измерений исключается в силу отсутствия измерителей. Задача оценивания состояния ОУ в реальных САУ решается в условиях параметрической неопределенности модели движения ОУ и ошибок измерений его выходных переменных. Формирование детерминированной модели движения ОУ требует идентификации указанных факторов априорной неопределенности процесса управления в режиме нормального функционирования ОУ.



### 3. Обоснование метода идентификации факторов априорной неопределенности процесса управления

По способу обработки измерительной информации методы идентификации подразделяются на **оперативные и ретроспективные**. При **оперативной идентификации**, идентификации в замкнутом контуре, обеспечивается текущее отслеживание меняющихся характеристик объекта. На основе рекуррентных алгоритмов, реализуемых в темпе протекания процесса управления, оценка параметров модели уточняется в реальном времени на каждом шаге поступления новых измерений. Оценивание параметров при помощи **ретроспективных алгоритмов идентификации**, когда решение получается в результате обработки всего накопленного массива данных, относится к методам идентификации вне контура регулирования и не позволяет обрабатывать наблюдения последовательно, в порядке их поступления. Ретроспективные алгоритмы идентификации использовались при обработке массивов входных и выходных данных, полученных в процессе специальных идентификационных экспериментов на объекте управления [10], для формирования моделей, которые применяются на этапах проектирования САУ.

**Методы оперативной идентификации** не позволяют получить модель движения ОУ, пригодную для реализации ИМО. Причина — необходимость использования в системе оценивания связи по текущей невязке выхода модели и измеряемого выхода ОУ. Такая связь используется, например, в структуре динамического наблюдателя состояния ОУ, представленной на рис. 2. Очевидно, что указанный сигнал невязки определяется с погрешностью, равной погрешности измерения выхода ОУ, которая непосредственно влияет на процесс коррекции модели ОУ, снижая точность идентификации модели.

**Методы ретроспективной (послеопытной) идентификации** предусматривают процедуры поиска реализованных значений всей совокупности априорно неопределенных параметров САУ. Следовательно, они позволяют проводить идентификацию неопределенных параметров как возмущающих воздействий, так и измерений. Иными словами, в классе ретроспективных методов идентификации могут быть выполнены условия параметрической идентифицируемости САУ [1]. Таким образом, для решения рассматриваемой проблемы выбирается класс ретроспективных методов идентификации.

Сформулируем отличия системных технологий, базирующихся на оперативной и ретроспективной идентификации динамического объекта. Ретроспективная идентификация — ключевой элемент метода оценивания ОУ, развиваемого в настоящей работе.

1) Отличие целевых функций идентификации. Оперативная идентификация относится к классу задач динамического проектирования САУ — созданию систем адаптивного и робастно-адаптивного управления динамическими объектами. Рассматриваемая задача ретроспективной идентификации относится к задачам информационного обеспечения процессов управления.

2) Отличие требований к точности идентификации. Модель, используемая для имитационного оценивания состояния динамического объекта, требует более точного выполнения критериев идентификации, чем модель, применяемая для адаптации САУ этим объектом к изменяющимся условиям функционирования [11].

3) Отличие алгоритмической структуры систем оперативной и ретроспективной идентификации. Для оперативной идентификации применяются в основном рекуррентные алгоритмы, реализующие оптимизацию гаусс-марковских процессов оценивания параметров настраиваемой модели. Методы ретроспективной идентификации базируются на поисковых алгоритмах идентификации — построению последовательностей значений искомым параметров модели, обеспечивающих достижение экстремума функционала идентификации.

Для реализации методов ретроспективной идентификации необходимо выделить на временном интервале процесса нормального функционирования ОУ интервал накопления массива данных о входах и выходах ИУС и ОУ. Будем называть этот интервал интервалом наблюдения. Входы ИУС — задающие воздействия, формируемые источником информации о задачах управления (см. рис. 1), выходы ИУС — управляющие воздействия. Процесс изменения управляющего воздействия рассматривается как точно измеряемый процесс [4]. Корректность такого допущения обусловлена применением цифровых устройств обработки информации. В этих устройствах с высокой точностью (в форме цифрового кода) отображаются заданные элементы положения и движения органов управления, которые преобразуются во входные сигналы сервосистемы. Последняя может быть отнесена к ОУ (структура, представленная на рис. 1, допускает соответствующую корректировку). Соответственно, измеряемые параметры положения и движения органов управления (выходы сервосистемы) дополняют вектор координат состояния ОУ. Выходы устройства обработки информации относятся к точно измеряемым управляющим входам ОУ.

Необходимость **концепции точно измеряемых управлений** обусловлена тем, что идентификация факторов неопределенности в замкнутых САУ базируется на феномене дуализма управления, который был открыт

и существенно развит А. А. Фельдбаумом [12]. Организация взаимодействия процесса оценивания состояния ОУ и процесса управления (комплексный подход к решению задач оценивания состояния ОУ и синтеза закона управления) базируется в системах дуального управления на двойственном характере управляющих воздействий. Принцип дуализма управляющего воздействия, заключающийся в единстве познавательной и управляющей функций, является альтернативой принципу разделения, на котором основана возможность независимого решения задач информационного обеспечения и динамической оптимизации процессов управления. Строгое доказательство справедливости принципа разделения существует только для линейно-квадратичных задач оптимального управления марковскими процессами. Принцип дуализма управления может быть использован в целях оптимизации ИУС не только в системах дуального управления с активным накоплением информации, в которых для идентификации ОУ формируются пробные сигналы управления, но и в системах с пассивным накоплением информации [12], которые рассматриваются в настоящей работе.

#### **4. Мгновенное апостериорное оценивание — новый принцип обработки информации в информационно-управляющих системах**

*Мгновенное апостериорное оценивание (МАО) — оценивания состояния ОУ в результате моментальной обработки информационного массива, который отображает управляемый процесс на заданном интервале наблюдения [13]. МАО — реализация принципиально нового вида циклограммы обработки информации в режиме нормального функционирования ОУ. Целевую функцию МАО можно определить как оценивание процесса управления при полной априорной информации, иными словами — реализацию ИМО.*

Более детальное рассмотрение процесса МАО показывает, что он представляет собой единый процесс идентификации факторов априорной неопределенности процесса управления и оценивания состояния ОУ. На каждом шаге поиска оптимальных оценок векторов параметров возмущений и ошибок измерений реализуется моделирование процесса управления на интервале наблюдения. Результат моделирования необходим для вычисления критерия идентификации — функционала, определяющего степень близости реализованного (зарегистрированного) и моделируемого выхода ОУ на интервале наблюдения, при значениях векторов возмущений и ошибок измерений, проверяемых на данном шаге поиска. В то же время результат моделирования — оценка процесса изменения состояния ОУ на интервале наблюдения, соответствующая проверяемым значениям указанных случайных векторов.

При достижении минимума критерия идентификации (на завершающем шаге поиска), соответствующего оптимальным оценкам векторов случайных параметров, моделирование процесса управления обеспечивает оптимальную оценку состояния ОУ.

*Процесс управления на интервале наблюдения* должен удовлетворять условию нахождения фазовой траектории ОУ в области допустимых траекторий. Это требование накладывает ограничения на уровень погрешностей, определяемых с применением МАО.

Все расчеты, связанные с ретроспективной идентификацией и оцениванием координат состояния ОУ, могут быть реализованы только после завершения интервала наблюдения. Каковы условия использования этих оценок с целью исправления фазовой траектории ОУ, имеющей отклонения от заданной траектории из-за ошибок измерений? Во избежание устаревания корректирующей информации, длительность оценивания должна быть пренебрежимо мала, по сравнению с длительностью интервала наблюдения. Формирование оценок состояния ОУ мгновенно в момент завершения интервала наблюдения по динамическому воздействию на САУ эквивалентно однократной (дискретной) коррекции от внешнего источника информации.

Длительность интервала наблюдения зависит от уровня накапливающихся ошибок измерений и длительности переходного процесса системы регулирования корректируемого навигационного или пилотажного элемента полета. Уменьшение длительности интервала наблюдения позволяет упростить структуру идентифицируемых моделей возмущений и измерений. Точность вычисления интегрального критерия идентификации увеличивается с увеличением длительности наблюдения. Указанное наличие противоположно действующих факторов обуславливает существование оптимальной по точности идентификации длительности интервала наблюдения. Указанная оптимальная длительность очевидно различна для систем автопилотирования и траекторного управления. После завершения процесса МАО для первого интервала наблюдения дальнейшая его реализация может осуществляться с использованием скользящего интервала наблюдения с частичным обновлением накопленного массива данных о процессе управления.

Реализация МАО предполагает наличие вычислительных ресурсов, обеспечивающих:

- 1) Регистрацию и запоминание значительных объемов информации об управляемом процессе на интервале наблюдения.
- 2) Практически мгновенную реализацию поискового алгоритма идентификации множества параметров. При этом в каждом цикле поиска (для каждого варианта множества значений искомых параметров) должен имитироваться процесс управления на интервале наблюдения

и его сравнение (по интегральным критериям) с зарегистрированным процессом.

В качестве интегральных критериев сравнения могут применяться классические нормы разностей сравниваемых функций [14]:

$$\Phi_1 = \|y^*(\tau) - y_M(\tau)\| = \int_{\tau_0}^{\tau_f} |y^*(\tau) - y_M(\tau)| d\tau,$$

$$\Phi_2 = \|y^*(\tau) - y_M(\tau)\| = \int_{\tau_0}^{\tau_f} ((y^*(\tau) - y_M(\tau))^2) d\tau,$$

где  $y^*(\tau)$ ,  $y_M(\tau)$  – сравниваемые на интервале наблюдения  $[\tau_0, \tau_f]$  функции, реализованная и полученная в результате математического моделирования.  $\Psi_2 = -10 \lg \Phi_2$

Экстремумы (минимумы) функционалов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  имеют нулевые значения. Сверхвысокая чувствительность значений функционалов к вариациям искомым параметров, приводит к сложности реализации алгоритма поиска. Поэтому целесообразно использовать логарифмическую шкалу функционалов сравнения. Были проведены исследования, в которых вместо процесса поиска минимумов  $\Phi_1$  и/или  $\Phi_2$  реализован процесс поиска максимумов  $\Psi_1 = -20 \lg \Phi_1$  и/или  $\Psi_2 = -10 \lg \Phi_2$ , где  $\lg$  – логарифм по основанию 10. Указанные исследования показали ряд преимуществ применения логарифмической шкалы функционалов невязок. Получена оценка достижимой точности идентификации отклонений случайных параметров от нулевых значений, которая составила  $10^{-14}$ . Оценка достижимых уровней относительных отклонений от максимальных значений случайных параметров составила  $10^{-11}$ . Большое значение для построения поисковых алгоритмов имеет возможность назначения уровней функционалов, обеспечивающих не превышение заданной относительной погрешности идентификации. При этом вплоть до вышеуказанного значения относительной погрешности, равного  $10^{-11}$ , чувствительность  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  к изменениям искомым параметров постоянна и составляет 20 дБ/дек. (20 единиц на десятикратное изменение параметра).

## 5. Структура системы мгновенного апостериорного оценивания состояния объекта управления

Будем исходить из того, что параметры режима полета доступны контролю по измеряемым внешним факторам и известно, как должен настраиваться регулятор в зависимости от режима полета. Тогда можно

использовать прямой метод настройки регулятора, т. е. адаптацию САУ по разомкнутому контуру. Такой подход применим для управления летательным аппаратом, оснащенным системой воздушных сигналов. Состав и точность аэрометрических измерений позволяют определить параметры режима полета, которые обеспечивают настройку параметров регуляторов САУЛА для ее адаптации к условиям полета. Такой подход позволяет ограничиться идентификационным процессом, обеспечивающим коррекцию ошибок измерений, применяемых для реализации обратных связей по выходу или состоянию ОУ. В составе автономных информационных систем ЛА, обеспечивающих реализацию обратных связей, помимо системы воздушных сигналов, широко применяются: система инерциальной навигации; доплеровский измеритель скорости и угла сноса, система дальнометрирования, в том числе измерители истинной высоты полета.

В постановочной части структурного синтеза системы МАО целесообразно определить условия, которые позволяют конкретизировать задачу и максимально просто представить структуру алгоритма МАО. Примем следующие условия решения указанной задачи синтеза:

- Решена задача подавления шума измерений входа и выхода ОУ, которая, как правило, может решаться независимо от задач идентификации ОУ и синтеза закона управления.
- Рассматривается вариант построения САУ с полнокомпонентным мгновенным измерением [1], которое реализует преобразование вектора состояния ОУ  $y$  в равноразмерный вектор выхода ОУ  $z$ . Наиболее простой вид указанного преобразования:  $z = y + \xi_z$ , где  $\xi_z$  — вектор ошибок измерения вектора выхода ОУ.
- Компоненты возмущения, частоты которых находятся вне полосы пропускания САУ как фильтра нижних частот, не учитываются в рабочей модели ОУ.
- Процесс изменения управляющего воздействия рассматривается как точно измеряемый процесс [1].
- Определена структура управляющих устройств (регуляторов) из состава синтезируемой САУ, а также алгоритмы настройки их параметров.
- Задача формирования апостериорных оценок координат состояния ОУ, инвариантных к погрешностям измерений, решается для САУ, обеспечивающей реализацию режима нормального функционирования ОУ.

Функциональная структура САУЛА для режима нормального функционирования ОУ представлена на рис. 5, где дополнительно введены следующие обозначения:

$y^*$  — измеренный вектор состояния (выхода) ОУ;  $p$  — вектор состояния среды функционирования (атмосферы);  $W$  — вектор возмущения;  $\mu$  — вектор параметров объекта управления;  $\hat{\lambda}$  — оценка вектора параметров режима полета.

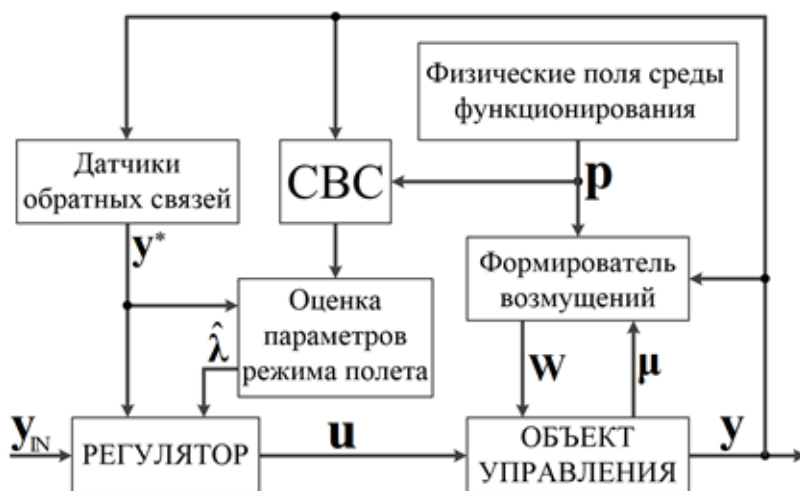


Рис. 5. Функциональная структура САУЛА

Структурная схема системы параметрической идентификации процесса управления в режиме МАО представлена на рис. 6. Массив данных, сформированный на интервале наблюдения, хранится в памяти регистратора в виде временных последовательностей векторных переменных. Приняты следующие обозначения элементов массива данных:  $u_{L1}$  — элемент последовательности точно измеряемых векторов управления (векторов выхода регулятора);  $\hat{\lambda}_{L2}$  — элемент последовательности оценок вектора параметров режима полета;  $y_{L3}^*$  — элементы последовательностей измеренных векторов состояния (выхода) ОУ;  $L1, L2, L3$  — индексы цифровых массивов данных зарегистрированных переменных. Алгоритм интерполяции определяет значения зарегистрированных переменных в произвольный момент модельного времени  $\tau$ .

$h(y, \eta)$  — модель измерений, где  $h$  — векторная функция наблюдения, размерность которой соответствует размерности вектора состояния ОУ. Вектор выхода модели измерений  $\tilde{y}$  — оценка измеренного вектора состояния (выхода) ОУ.

Префиксом  $\Delta_K$  обозначены сигналы коррекции соответствующих настраиваемых векторов в цикле поиска их оптимальных значений. В каждом цикле поиска имитируется процесс управления на интервале наблюдения. Оптимальным оценкам реализаций априорно неопределенных векторов параметров возмущающего воздействия на ОУ  $\mu$  и измерений  $\eta$  соответствует минимальное расстояние

в функциональном пространстве между двумя векторными функциями, отображающими реальный и моделируемый выход управляемой системы.



Рис. 6. Структура системы этапа 1 MAO состояния ОУ

Главная проблема комплексной параметрической идентификации САУ с использованием алгоритмической структуры системы идентификации и оценивания, представленной на рис. 6, заключается в том, что для получения модели ОУ, обеспечивающей реализацию ИМО, необходимо разделение массивов (векторов) параметров возмущений и ошибок измерений (помех).

Несмотря на различие структур моделей возмущений и помех, которые формируются на базе физических законов, целесообразно реализовать **проверку точности выполнения условия разделимости** и корректировку при необходимости результата идентификации, который получен в рамках структуры системы MAO, представленной на рис. 6. Иными словами, речь идет о двухэтапном режиме MAO, а алгоритмическая структура, отображаемая на рис. 6, относится только к этапу 1 MAO.

Указанная выше проверка, выполняемая на этапе 2 MAO, может базироваться на оценке степени соответствия процесса изменения вектора управления  $u(\tau)$ , зарегистрированного на интервале наблюдения, и вектора  $u_m(\tau)$ , сформированного апостериорной моделью САУ, которая получена в результате идентификации на этапе 1.

Структурная схема этапа 2 MAO представлена на рис. 7. Для этого этапа должен быть дополнительно зарегистрирован массив векторных входов САУ, элемент которого обозначен  $y_{INL4}$ . В процессе функционирования структуры этапа 2 на соответствующие входы должны подаваться оценки реализаций вектора эквивалентного



возмущения и измеренного значения вектора состояния ОУ, которые формируются на завершающем цикле их поиска и оценивания этапа 1 МАО. Указанные входы обозначены на рис. 7 переменными  $w_{\sigma_f}(\tau)$  и  $\tilde{y}_f(\tau)$  соответственно. Процедуры регистрации и интерполяции этих переменных не отображены на рисунке во избежание его громоздкости.

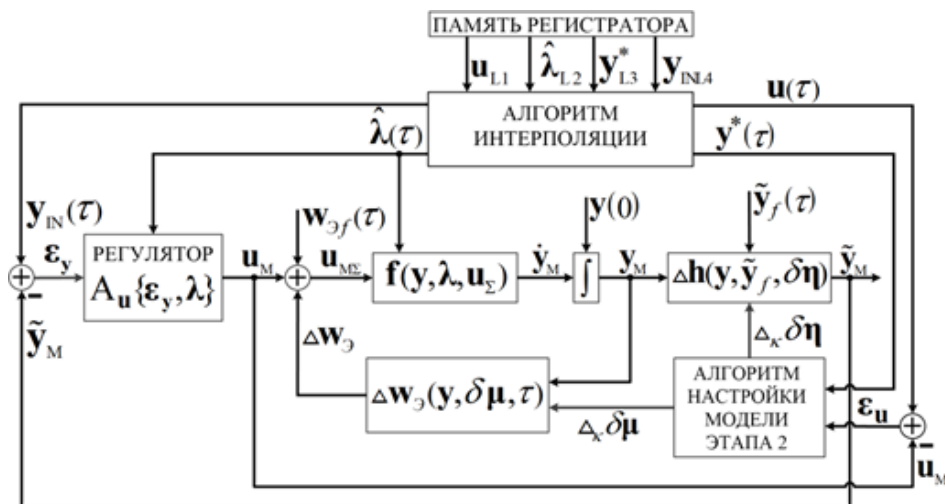


Рис. 7. Структура системы этапа 2 МАО состояния ОУ

Переменные, формируемые моделью замкнутой САУ, отмечены индексом «м». Как и на рис. 3,  $\epsilon_y$  — векторный сигнал ошибки САУ. Дополнительно введены следующие обозначения:  $\epsilon_u$  — сигнал невязки векторов управления, зарегистрированного и сформированного апостериорной моделью САУ;  $\Delta w_\sigma$  — корректируемая на этапе 2 МАО векторная функция эквивалентного возмущения;  $\Delta h$  — корректируемая на этапе 2 МАО векторная функция измерений;  $\delta\mu$ ,  $\delta\eta$  — корректируемые подвекторы параметров эквивалентного возмущения и ошибок измерений, соответственно;  $A_u\{\epsilon_y, \lambda\}$  — оператор закона управления.

Состав корректируемых на этапе 2 параметров должен определяться в процессе предпроектных исследований моделей возмущений и помех, а также методами численного сравнительного анализа текущих реализаций компонент возмущений и помех.

## Заключение

Сформулированы основные теоретические положения возможного подхода к созданию систем автоматического управления, инвариантных к ошибкам датчиков обратных связей, реализующих измерение вектора выходных переменных объекта управления.

## Литература

1. Справочник по теории автоматического управления. / под ред. Красовского А. А. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
2. *Петров Б. Н.* Принцип инвариантности и условия его применения при расчете линейных и нелинейных систем. // Тр. 1, Междунар. конгр. ИФАК. Т. 1. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 259–275.
3. *Мещанов А. С.* Идентификация и компенсация возмущений в управлении нелинейными объектами. // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева, 2010, № 3. – С. 164–173.
4. Адаптивное управление возмущенными системами. Учебное пособие. / Борцов А. А., Никифоров В. О., Пыркин А. А. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.
5. Принцип инвариантности в измерительной технике. / Петров Б. Н., Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. – М.: Наука, 1976. – 242 с.
6. *Шакурский В. К.* Синтез инвариантных преобразователей методом контрольного значения. // Автомат. и телемех., 1998. Выпуск 3. – С. 42–49.
7. *Нестеров В. Н., Ли А. Р.* Теория и практика построения измерительных преобразователей и систем на основе принципа двухканальности. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2016. Т. 18, № 4(7). – С. 1414–1422.
8. *Нестеров В. Н.* Инвариантные параметрические преобразователи. // «Экономика и качество систем связи», 2023. Выпуск 1. – С. 49–57.
9. Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем. / Краснова С. А., Уткин В. А. – М.: Наука, 2006. – 272 с.

10. Идентификация объектов управления. / Дилигенская А. Н. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. — 136 с.

11. Основы идентификации систем управления. / Эйкхофф П. — М.: Мир, 1975. — 686 с.

12. *Фельдбаум А. А.* Теория дуального управления. // Автомат. и телемех.: 1960, том 21, выпуск 9, — с. 1240—1249; 1960, том 21, выпуск 11, — с. 1453—1464; 1961, том 22, выпуск 1, — с. 3—16; 1961, том 22, выпуск 2, — с. 129—142.