

УДК 681.511

Р.И. Балабаев, М.Ю. Медведев

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТОМ-АМФИБИЕЙ НА ОСНОВЕ БЛОЧНОГО
ПОДХОДА****Введение**

Исследованию свойств устойчивости, управляемости, наблюдаемости и синтезу законов управления нелинейных систем уделяется значительное внимание. Наиболее общие результаты в этих направлениях получены в теории линейных систем. Современные технические системы функционируют вдали от положения равновесия и для их исследования необходимо использовать нелинейные математические модели с учетом взаимосвязей между каналами управления. Однако методы исследования нелинейных систем в настоящее время не обладают логической завершенностью методов исследования линейных систем и во многих случаях носят скорее теоретический, чем прикладной характер. Выделим ряд подходов исследования нелинейных систем.

Так, следует отметить предложенный в [1] подход к исследованию управляемости посредством условий общности положений (УОП) дающий достаточные условия управляемости, геометрические методы исследования управляемости [2], структурные условия управляемости, изложенные в [3], базирующиеся на естественных каскадных свойствах математических моделей подвижных объектов. Также отметим работу [4], где приведены результаты анализа управляемости для математических моделей (ММ) электромеханических систем четвертого порядка с двумя управлениями. В работе [5] показано существование управляемой формы Жордана уравнений аффинных по управлению нелинейных систем с одним управлением. Однако, несмотря на множество направлений развивающихся в рамках перечисленных выше подходов, в литературе практически отсутствуют примеры исследования многосвязных нелинейных ММ большой размерности. Как показал анализ выделенных направлений исследования, основной причиной ограничения размерности вектора R^n состояния и управления R^m является детерминантное условие управляемости, анализ которого затрудняется при больших значениях n и m . Естественным подходом в этом случае является декомпозиция, однако ее применение требует известной осторожности, так как она может привести к потере ряда важнейших свойств. Это тем более справедливо для нелинейных систем, склонность которых к бифуркации является скорее правилом, чем исключением. В связи с этим актуален поиск методик и процедур, которые бы позволили обойти указанные ограничения на порядок системы и размерность вектора управления.

Постановка задачи попадания системы на многообразия, отражающие взаимосвязь переменных состояния, характерна для методов синтеза законов управления нелинейных системам [6]. Такой подход, например, предложен в работе [7] и развит в методе АКАР синергетической теории управления [8], реализующий динамическую декомпозицию системы при синтезе. Сущность этого подхода заключается в том, что движение системы происходит через ряд гиперплоскостей образованных переменными состояниями системы. При этом движение между гиперплос-

скостями формируется как естественными свойствами системы, так и заданными требованиями к качеству переходных процессов. В связи с этим сформулируем цель структурно-качественного исследования управляемости нелинейной, разомкнутой системы. Цель анализа управляемости – выявление особых многообразий в пространстве состояния, на которых нелинейной системе не могут быть приданы любые желаемые динамические свойства и траектории движения. Такая постановка задачи дает достаточные, в классическом смысле, условия управляемости.

В теории оптимального управления вопрос наличия в пространстве состояния системы особых многообразий является первым этапом исследования системы. В случае наличия особенностей предполагается дальнейшее исследование системы. Однако в свете постановки задачи синтеза, приведенной выше, полученные в результате анализа особенности, могут быть использованы непосредственно в процедуре синтеза. Например, для задания целей управления в виде аттракторов и репеллеров. Так, в [4, 9] приведены результаты моделирования асинхронного генератора при задании режима функционирования в виде особой точки типа “пределный цикл”.

В связи с вышесказанным, такую постановку задачи можно считать достаточно актуальной при анализе нелинейных многомерных систем как одноканальных, так и многосвязных.

Одним из направлений практического использования данных теоретических исследований является авиастроение, поэтому после описания теоретических предпосылок процедуры анализа управляемости рассмотрим некоторые примеры анализа нелинейных математических моделей самолета-амфибии.

Необходимость использования новых подходов при проектировании летательных аппаратов обусловлена следующими причинами. Для адекватного описания большинства режимов полета самолета необходимо использование полных нелинейных математических моделей описывающих динамику и кинематику движения летательного аппарата, а также состояния водной и воздушной сред. Для самолета-амфибии это наиболее актуально, так как водная и воздушная среды предъявляют, как правило, диаметрально противоположные требования к летно-техническим характеристикам самолета. Современные самолеты проектируются с заранее заданными минимальными запасами устойчивости и площадей рулевых органов для снижения потребления временных и энергетических ресурсов. В связи с этим при проектировании самолета-амфибии выдвигаются очень жесткие требования к качеству функционирования систем ручного и автоматического пилотирования и траекториям движения самолета.

Класс исследуемых математических моделей

Выделим класс нелинейных, аффинных, каскадных динамических систем характерный для большинства технических систем, таких как летательные аппараты, рулевые приводы ЛА, мобильные роботы и др. Системы такого класса были рассмотрены при анализе в [1, 2, 5, 9], а также при синтезе систем управления [7, 8] и др.

Процедура блочного исследования управляемости

Сформируем процедуру структурно-качественного исследования управляемости. Рассмотрим нелинейную, каскадную, аффинную динамическую систему обычных дифференциальных уравнений размерностью R_n^2, R_m^1 в общем виде

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = f_1(x_1, u) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = f_2(x_1, x_2) \end{cases}, \quad (1)$$

где x_1, x_2 – переменные состояния системы, u – управление, $f_1(x_1, u), f_2(x_1, x_2)$ – дифференцируемые необходимые числа раз функции, описывающие внутреннее состояние объекта, $\partial^2 f_1 / \partial u^2 = 0, \partial^2 f_2 / \partial u^2 = 0$.

Анализируя структуру систем такого класса (1), предположим возможность упрощения процедуры анализа, а именно выделение блоков системы допускающих декомпозицию процедуры анализа на последовательность однотипных процедур анализа отдельных блоков системы предполагая взаимосвязь между блоками системы через переменные состояния. Для таких переменных состояния введем термин “внутренние” управления.

Основываясь на этом предположении сделаем вывод, что такая декомпозиция не приводит к потере взаимосвязей системы, а, следовательно, к потере отдельных свойств системы, как это происходит, например, при оценке свойств управляемости линейного приближения исходной нелинейной системы.

Представление нелинейной системы (1) через Якобиан дает эквивалентную систему, отражающую все свойства исходной системы [9]. На основании этого матрица управляемости, представляющая собой фактически Якобиан по вектору “внутренних” и “внешних” управлений, будет иметь вид

$$B_\varphi(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(x_1, u)}{\partial u} & \frac{\partial f_1(x_1, u)}{\partial x_1} \\ 0 & \frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_1} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Тогда условием управляемости системы (1) на основании матрицы (2), будет

$$\det B_\varphi \neq 0. \quad (3)$$

Исходя из этого получим критерий управляемости системы (1):

$$\frac{\partial f_1(x_1, u)}{\partial u} \frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_1} \neq 0. \quad (4)$$

Подчеркнем, что критерий (4) дает функциональные зависимости переменных состояния системы, которые позволят провести качественную оценку свойства управляемости системы.

Доказательство полученного условия проведено преобразованием (1) к канонической управляемой форме, что показывает правильность сделанного выше предположения.

Распространим критерий (4) на многомерные системы $R_n^{1..n}, R_m^1$.

Запишем систему такого вида в общем виде

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = f_1(x_1, u) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = f_2(x_1, x_2) \\ \dots \\ \frac{dx_n(t)}{dt} = f_n(x_{n-1}, x_n) \end{cases}, \quad (5)$$

где x_1, x_2, x_3 – переменные состояния системы, u – управление, $f_1(x_1, u), f_2(x_1, x_2), f_n(x_{n-1}, x_n)$ – дифференцируемые функции, описывающие внутреннее состояние объекта, $\partial^2 f_1 / \partial u^2 = 0, \partial^2 f_2 / \partial u^2 = 0$.

Структурная схема системы (5) рассмотрена на рис. 1.

Матрица управляемости примет следующий вид:

$$B_\varphi(x) = \begin{pmatrix} B_\varphi^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_\varphi^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_\varphi^n \end{pmatrix},$$

где элементами $B_\varphi^1, B_\varphi^2 \dots B_\varphi^n$ являются матрицы вида (2).

Тогда критерием управляемости будет:

$$\frac{\partial f_1(x_1, u)}{\partial u} \cdot \frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial f_3(x_2, x_3)}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_{n-1}(x_{n-2}, x_{n-1})}{\partial x_{n-2}} \cdot \frac{\partial f_n(x_{n-1}, x_n)}{\partial x_n} \neq 0.$$

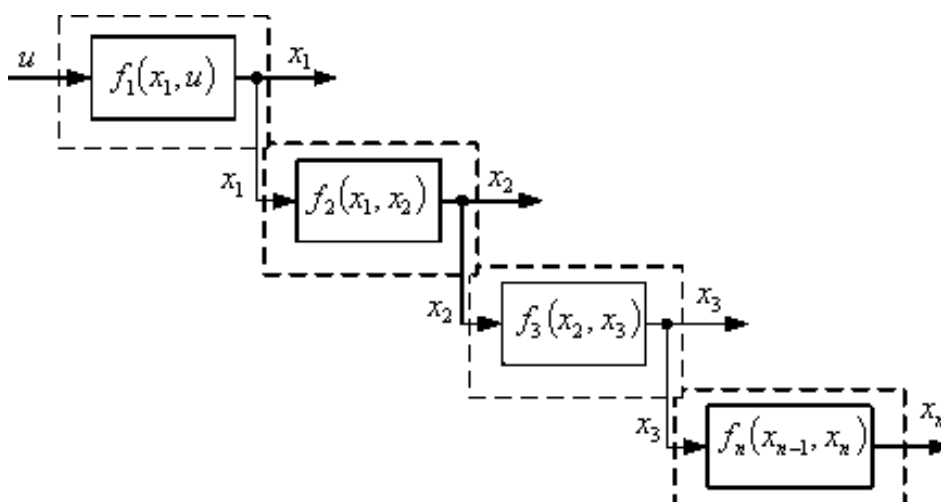


Рис. 1. Структурная схема каскадной системы порядка n с одним каналом управления

Таким образом, получены необходимые и достаточные условия управляемости нелинейных, аффинных, каскадных систем с одним каналом управления $R_n^{1..n}, R_m^1$.

Отметим что система, показанная на рис. 1, является частным случаем блочно-каскадной системы, структура которой изображена на схеме (рис. 2):

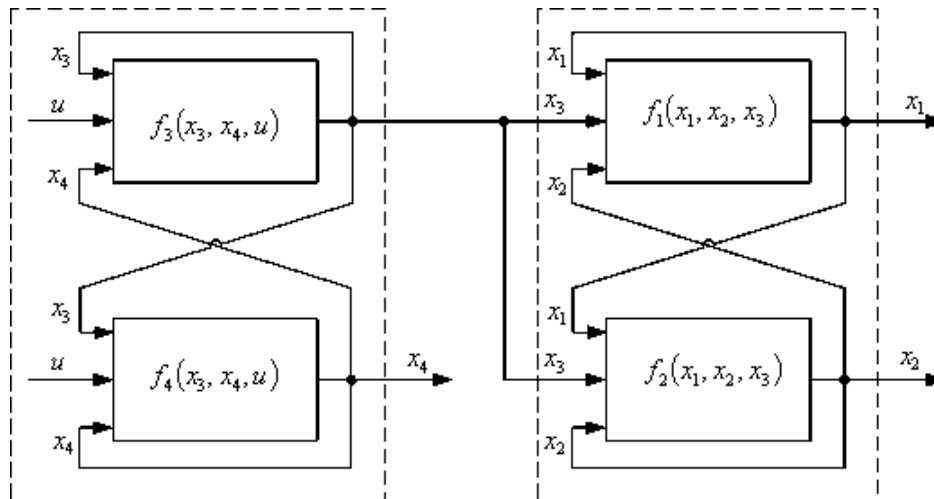


Рис. 2. Структурная схема блочно-каскадной системы порядка n

В этом случае анализ блоков системы может быть произведен любым методом наиболее подходящим в данном случае, а дальнейший анализ управляемости проводится согласно описанной ранее процедуре блочного анализа.

Процедура анализа нелинейных, многосвязных систем

Распространим процедуру анализа на многосвязные, многомерные, нелинейные, аффинные, каскадные математические модели. Воспользуемся полученными в [1] условиями управляемости. Применительно к многосвязным системам предложенная выше процедура будет иметь следующий вид. Анализ выделенных блоков системы будем проводить посредством условий общности положений. При этом корректность такой процедуры обосновывается, так же как и для одноканальных систем, наличием “внутренних” управлений связывающих блоки системы. Процедура позволяет получить достаточные условия управляемости многосвязные, многомерные, нелинейные, аффинные, каскадные системы. Примеры анализа таких систем будут приведены ниже.

Процедура синтеза нелинейных систем управления

Процедура синтеза сформирована на основе метода АКАР синергетической теории управления, активно развивающейся в последнее время. Полученная процедура оформлена в виде модуля, позволяющего формировать цели управления с учетом полученных условий управляемости и моделировать замкнутую систему при заданных начальных условиях.

Программный комплекс анализа и синтеза

Полученные процедуры анализа и синтеза нелинейных динамических систем оформлены в программный комплекс (ПК) автоматизированного анализа и синтеза

законов управления. Реализация комплекса выполнена в среде символьных вычислений **Maple** и оформлена в виде библиотек процедур **Analysis** и **Synthesis**. Так же сформирована библиотека нелинейных математических моделей **Mathematical model**. Схему взаимодействия оператора с ПК покажем на рис. 3.



Рис. 3. Схема взаимодействия оператора с ПК

В ПК проведен анализ управляемости нелинейных математических моделей самолета амфибии в режимах посадки и плавания по водной поверхности. Приведем результаты анализа.

В режиме посадки рассмотрена математическая модель самолета с раскрытием аэродинамических характеристик и характеристиками силовой установки. Были получены следующие функциональные зависимости, отражающие взаимосвязь скорости V , высоты H и характеристик силовой установки и взаимосвязь между углом наклона траектории, скоростью полета и аэродинамическими характеристиками самолета:

$$qSb_a N_{mz} / I_z \neq 0, \\ (-A + B \cdot V) \cdot V + (-C + D \cdot H) \cdot H \neq 0, \\ g \cos(\vartheta + \alpha) m - \rho V^2 / 2 SL_{cx} \neq 0, V \neq 0.$$

В режиме плавания рассмотрена базовая модель самолета амфибии без раскрытия компоновочных решений, аэродинамических и гидродинамических характеристик. В результате анализа получены следующие зависимости, совпадающие с результатами, приведенными в [10]:

$$\frac{1}{(1 + k_{66}) I_z} \neq 0, \frac{\sin(\beta)}{(1 + k_{11}) \rho V_1 V} \neq 0, \frac{\cos(\beta)}{(1 + k_{22}) \rho V_1 V} \neq 0, V \neq 0.$$

Для анализа конкретного объекта исследования необходимо раскрыть аэродинамические и гидродинамические характеристики самолета.

По результатам анализа синтезированы законы управления гипотетического самолета-амфибии в режиме посадки и в режиме плавания. Результаты моделирования замкнутой системы самолет – автопилот подтверждают результаты проведенных исследований и существенно дополняют результаты, приведенные в [11, 12].

Заключение

В результате проведенных исследований получена процедура анализа управляемости и синтеза системы управления самолета амфибии. Сформирован программный комплекс анализа и синтеза. Полученные результаты анализа использо-

ваны при синтезе законов управления автопилота самолета-амфибии в режиме посадки на основе полной нелинейной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Олейников В. А.* Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. – Л.: Изд-во Недра, 1982. – 216 с.
2. *Краснощеченко В.И., Крищенко А.П.* Нелинейные системы: геометрические методы анализа и синтеза. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 520с.
3. *Пищопов В.Х.* Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // МАУ. 2008. – №2.
4. *Колесников А.А., Беляев В.Е., Попов А.Н.* Свойство управляемости нелинейных электроприводов и турбогенераторов // Межвузовский тематический научный сборник: синтез алгоритмов сложных систем. Москва-Таганрог, –1997. – С. 147-179.
5. *Гайдук А.Р.* Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // Автоматика и телемеханика. № 7, – 2006. С. 3 – 12.
6. Справочник по теории автоматического регулирования / Под ред. *Красовского А.А.* 1987. – 711с.
7. *Бойчук Л.М.* Структурный синтез автоматических многоуровневых систем функционального управления динамическими объектами. Препринт 74-23. Изд-во института кибернетики АН УССР, Киев, 1974.
8. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 540с.
9. *Isidori A.* Nonlinear control systems. N.Y.: Sprringer-Verlag, 1995.
10. *Балабаев Р.И.* Процедура анализа нелинейных математических моделей самолета амфибии. – Донецк, 2009.
11. *Балабаев Р.И.* Синергетический синтез законов управления гидросамолета в режиме взлета и посадки // 5-я международная конференция «Авиация и космонавтика» МАИ (23-26 октября, 2006г.). Тезисы докладов.
12. *Балабаев Р.И.* Синтез закона управления легким самолетом-амфибией в режиме захода на посадку. Известия ТРТУ. – №9. Специальный выпуск: технические науки. – Таганрог, 2006. – С. 172–173.

УДК 629.7.072.1

В.В. Щербинин, П.П. Кравченко, Н.Ш. Хусаинов

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ
ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ С
КОРРЕКЦИЕЙ КООРДИНАТ ПО АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
БЛИЖНЕЙ РАДИОНАВИГАЦИИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Введение

Тактико-технические характеристики современных и перспективных летательных аппаратов (ЛА) требуют повышения эффективности решения навигационной задачи, заключающейся в выводе объекта в заданную точку пространства земной поверхности с установленной точностью для решения как военных, так и гражданских задач. В основу функционирования бортового оборудования ЛА закладываются все более совершенные алгоритмы навигации и управления.

В данной работе рассматриваются вопросы проектирования бортовой интегрированной системы навигации и управления (БИСУ) перспективного высокоскоростного ЛА и особенности ее функционирования на завершающем участке траек-