

УДК 629.7.054: 533.6

© С. В. Богословский

## КОНСТРУКТИВНЫЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ АЭРОМАГНИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В работе рассматриваются конструктивные способы реализации магнитной левитации физических моделей летательных аппаратов в аэродинамической трубе и особенности синтеза алгоритмов управления как алгоритмов управления мощностью магнитного подвеса. Установлено правило технико-экономических пропорций, которое рекомендуется использовать при планировании модернизаций исследовательских комплексов.

### ВВЕДЕНИЕ

Динамический аэромагнитный измерительный комплекс (АМИК) предназначен для исследования динамических свойств, устойчивости и управляемости летательных аппаратов (ЛА) и создания адекватных математических моделей исследуемых процессов и объектов.

История применения магнитной левитации (подвески) в промышленности берет свое начало примерно с 1911 года. Аэромагнитные измерительные комплексы созданы и активно используются для идентификации аэродинамических характеристик моделей ЛА в таких развитых странах, как Франция (Комитет по авиации и космонавтике ONERA), США (Научно-исследовательский центр им. Ленгли, Научно-испытательный центр им. Арнольда — AEDC, Университет штата Вирджиния), Англия (Национальный научно-исследовательский центр в Фарнборо, Саутгемптонский университет) [1]. Указанные комплексы представляют собой разновидности магнитных весов, измеряющих не только силы тяжести, но и аэродинамические силы, действующие на модели ЛА.

К настоящему времени выполнено много теоретических и практических работ, в том числе в области применения магнитной левитации в приборостроении [1, 2]. Обобщая результаты этих работ, можно выделить следующие основные направления, по которым совершенствуются магнитные подвесы (МП) в приборостроении:

- 1) оптимизация конфигурации МП;
- 2) оптимизация системы управления мощностью МП.

Постановка задачи первого направления оптимизации заключается в следующем. Имеется ограниченное множество апробированных в приборостроении способов магнитной левитации (активные, резонансные и др. подвесы). Необходимо выбрать комбинацию этих способов или предложить

новые способы, которые оптимизировали бы выбранный показатель эффективности.

Разработанные МП для аэродинамических труб [1] представляют собой систему мощных электромагнитов. Одним из недостатков МП первого поколения является их высокое энергопотребление. Например, потребляемая мощность описанной в [2] установки составляла 50 кВт.

Другим недостатком таких мощных систем МП является необходимость отвода большого количества теплоты. Применение системы охлаждения существенно увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты.

Исследования по повышению эффективности магнитных подвесов [3] показали целесообразность использования комбинации следующих способов создания магнитного поля.

- 1) Использование катушек с током на основе меди.
- 2) Использование постоянных магнитов на основе сплавов редкоземельных металлов (например, NdFeB), реализующих преимущественное прохождение магнитного потока вдоль направления намагничивания.
- 3) Использование магнитопроводов (шихтованных и монолитных).

На рисунке изображен вариант схемы магнитной подвески для аэродинамических труб (АДТ), допускающий возможность снижения энергопотребления.

Наборное поле (1) из постоянных магнитов (4) позволяет создать постоянную составляющую силы, действующей на несущее основание (3) физической модели, подвешиваемой в магнитном поле. Магниты на основе сплавов редкоземельных металлов имеют высокие характеристики намагничивания: коэрцитивная сила  $H_c > 3000$  кА/м; остаточная индукция  $B_r > 1$  Тл; относительная магнитная проницаемость  $\mu \approx 1$ ; максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{\max} > 300$  кДж/м<sup>3</sup>.

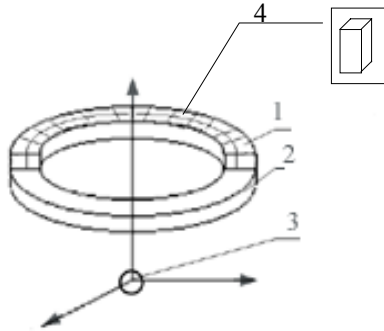


Схема размещения набора постоянных магнитов на соленоидах магнитной подвески

В этом случае соленоиды (2) могут быть использованы только для создания переменных составляющих сил магнитного взаимодействия.

В предлагаемом варианте математическая модель сил магнитной левитации может быть представлена в виде:  $Fm = I^T A_1 I + A_2 I + Fm_0$ , где  $Fm_0$  — постоянно действующая составляющая силы;  $A_1$  и  $A_2$  — постоянные или переменные трехмерные матрицы. Постоянная составляющая  $Fm_0$  обеспечивается постоянными магнитами.

Спецификой рассматриваемой задачи оптимизации является многокомпонентность МП, заключающаяся в том, что по различным компонентам (осям подвески) в качестве оптимальных могут выступать различные конфигурации МП, т. е. различные способы левитации.

Постановка задачи второго направления оптимизации заключается в выборе оптимальных способов и параметров управления мощностью МП. В качестве способов управления могут выступать управление амплитудой, фазой, частотой, формой тока или напряжением питания [1].

В качестве управляемых параметров могут быть использованы скорость нарастания и спада фронтов, амплитуда предварительного намагничивания, скважность импульсов и различные комбинации этих параметров.

### ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МП

В качестве показателя эффективности МП в настоящее время целесообразно принимать технико-экономические показатели, в которых технические показатели используются в качестве ограничений.

В соответствии с общими положениями теории исследования операций можно предложить следующее правило обоснования технико-экономической эффективности.

Основным назначением рассматриваемых в ра-

боте приборов является обеспечение требуемой точности определения параметров исследуемых процессов. Во многих случаях применяется следующее правило: если параметр определен неточно, исследовательский эксперимент считается потеряннным.

Для такой модели экспериментов можно получить простое соотношение между требуемым повышением точности эксперимента и затратами, благодаря которым это повышение достигнуто.

Предположим, что повышение точности эксперимента предполагается достичь внедрением какого-либо технического новшества (ТН). Тогда должно выполняться неравенство:

$$\Pi_{\text{ТН}} \leq \Pi, \quad (1)$$

где  $\Pi_{\text{ТН}}$ ,  $\Pi$  — финансовые потери от внедрения и от невнедрения ТН соответственно.

Потери от невнедрения ТН будут равны разности финансовых потерь от потери экспериментов без использования и при использовании ТН:

$$\Pi_{\text{НЕВН}} = (q \cdot C - q_{\text{МП}} \cdot C_{\text{ТН}}) \cdot N, \quad (2)$$

где  $q$ ,  $q_{\text{МП}}$  — вероятности потери эксперимента без использования и с использованием ТН соответственно;  $C$ ,  $C_{\text{ТН}}$  — стоимости эксперимента без использования и при использовании ТН соответственно;  $N$  — расчетное количество экспериментов.

Потери от внедрения ТН определяются разностью стоимостей экспериментов, оснащенных и не оснащенных ТН:

$$\Pi_{\text{ТН}} = (C_{\text{ТН}} - C) \cdot N. \quad (3)$$

Введем в рассмотрение коэффициент экономической эффективности  $\chi$  — относительную экономию финансовых потерь на каждый рубль затрат на внедрение ТН:

$$\chi = \frac{\Pi - \Pi_{\text{ТН}}}{(C_{\text{ТН}} - C)N}. \quad (4)$$

Следовательно, при известных значениях  $q$  и  $q_{\text{ТН}}$  можно оценить величину экономической эффективности внедрения ТН:

$$\chi = \frac{q \cdot C - q_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}} - C_{\text{ТН}} + C}{C_{\text{ТН}} - C}.$$

При заданной экономической эффективности ( $\chi \geq \chi_{\text{зад}}$ ) внедрения ТН по приведенным выше формулам можно оценить требуемую техническую эффективность нового научного прибора:

$$q_{\text{ТН}}|_{\text{ТРЕБ}} \leq q - (1 + \chi_{\text{зад}} + q) \cdot \frac{\Delta C}{C_{\text{ТН}}}, \quad (5)$$

где  $\Delta C = (C_{\text{ТН}} - C)$  — приращение стоимости экс-

перимента при внедрении ТН;  $\chi_{\text{зад}}$  — заданный коэффициент экономической эффективности. Учитывая, что в формуле (4) знаменатель больше нуля, получаем, что неравенство (1) будет выполняться только при  $\chi_{\text{зад}} > 0$ .

Если в качестве критерия технической эффективности принять уменьшение вероятности потери эксперимента, то из формулы (5) выводится следующее правило технико-экономических пропорций:

*приращение технической эффективности должно превосходить относительные затраты на инновации пропорционально величине требуемой экономической эффективности.*

Использование предлагаемого правила позволит вести сопоставимые обоснования эффективности инноваций применительно к различным видам приборов и приборных комплексов. Правило позволяет разрешить противоречие между техническими и экономическими показателями эффективности инноваций путем интеграции показателей в едином условии (5) технико-экономической эффективности. Однако обеспечение возможности использования преимуществ единого подхода накладывает жесткие ограничения на выбор формы представления показателей технической и экономической эффективности.

### ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для построения оптимального управления (в общем случае нелинейного) можно воспользоваться известными методами: методом аналитического конструирования регуляторов или методами, основанными на принципе максимума или на принципе двухканальности. Однако использование указанных методов затруднено по следующим причинам.

1) Математическая постановка задачи предполагает нахождение оптимального управления как функции времени, а в инженерной постановке задачи обычно требуется найти управление в виде функции координат вектора состояния.

2) Указанные методы разработаны для детерминированных систем, а в реальных МП возмущения имеют стохастический характер.

При оптимизации управления МП можно воспользоваться следующим алгоритмом преодоления перечисленных затруднений.

— Задается конечная система базисных функций (ступенчатых, гармонических, экспоненциальных) управляющего воздействия.

— В зависимости от параметров системы базисных функций определяются оптимальное управление и те компоненты вектора состояния, которые предполагается включить в закон управ-

ления.

— Из условия приближенного равенства решений задачи оптимизации во временной области и в пространстве состояний решается задача нахождения коэффициентов при координатах в зависимости от коэффициентов при базисных функциях времени.

Сигнал управления мощностью обычно имеет вид квадратичной функции токов [1]:

$$W_k = \sum_{i,j} B_{kij} \cdot I_i(\mathbf{X}) \cdot I_j(\mathbf{X}), \quad (6)$$

где  $W_k$  — координата вектора управляемой мощности;  $\mathbf{I} = (I_j)$  — вектор токов в катушках соленоидов;  $B_{kij}$  — коэффициенты квадратичных форм.

Сигнал управления как функцию времени целесообразно представить также в виде квадратичной функции

$$W_{tk} = \sum_{i,j} B_{kij} \cdot I_{ti}(\mathbf{C} \cdot \Phi) \cdot I_{tj}(\mathbf{C} \cdot \Phi), \quad (7)$$

где  $k$  — номер управляемой координаты вектора состояния  $\mathbf{X} = (X_k)$ ;  $W_{tk}$  — координата вектора управляющих функций как функций времени;  $I_{tj}$  — координата вектора токов как функция времени;  $\mathbf{C} = (C_{ij})$  — матрица коэффициентов оптимального управления;  $\Phi = (\Phi_j(t))$  — вектор базисных функций.

После нахождения матрицы  $\mathbf{C}$  оптимальных коэффициентов при управлении  $W_{tk}$  коэффициенты  $\mathbf{D}$  управляющих функций  $W_{xk}$  как функций координат можно найти из системы уравнений

$$\mathbf{I}_t(\mathbf{C} \cdot \Phi(t)) = \mathbf{I}_x(\mathbf{D}; \mathbf{X}_0(t)), \quad (8)$$

где  $\mathbf{X}_0(t) = (X_{0j}(t))$ ,  $\mathbf{I}_x(\mathbf{D}; \mathbf{X}_0(t))$  — вектор токов как функций координат вектора состояния,  $\mathbf{X}_0(t)$  — вектор координат состояния при оптимальном управлении,  $\mathbf{D} = (D_{ij})$  — матрица коэффициентов при функциях от координат в законе управления током.

На основании практического опыта решения задач идентификации можно рекомендовать оптимизировать решение уравнения (8), воспользовавшись критериями:

— минимальной ошибки аппроксимации  $|\mathbf{E}_k| = |\mathbf{W}_t - \mathbf{W}_x|$ ,

— минимального числа обусловленности линейной системы (8).

В качестве минимизирующих функций используются функции из набора вариантов базисных функций и коэффициенты, входящие в матрицу  $\mathbf{C}$ . В процессе поиска оптимального решения удается выделить значимые базисные функции, структуру матрицы  $\mathbf{C}$  и регуляризовать решение системы уравнений (8).

Предлагаемый подход не гарантирует получения строго оптимального решения, однако во мно-

гих случаях получается приемлемое решение. Несомненный эффект заключается в возможности уточнить постановку задачи и тем самым повысить вероятность получения оптимального решения.

Для учета случайных возмущений выделяется представительная выборка возмущающих воздействий и соответственно формируется вектор реализаций каждой координаты вектора состояния, т. е. вектор состояния и вектор управляемой мощности в уравнении (8) превращаются в матрицы управлений и состояний — в фазовые пространства управлений и состояний. Дальнейший ход поиска оптимального решения соответствует известному из теории идентификации методу дифференциальной аппроксимации. Применение этого подхода при синтезе управления мощностью МП еще более оправдано тем, что все решения получаются в ходе вычислительного эксперимента с требуемой точностью и дискретностью по времени. Поэтому в рассматриваемом случае устраняется основная причина редкой применяемости метода дифференциальной аппроксимации — зависимость погрешности от погрешности в задании исходных данных и от периода дискретизации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе освоенной технологии создания промышленного образца АМИК предполагается создать исследовательский комплекс как прототип АМИК нового поколения, позволяющий измерять аэродинамические характеристики моделей ЛА в процессе выполнения новейших пилотажных тех-

нологий.

Уникальной особенностью разрабатываемого комплекса должно стать обеспечение возможности измерений параметров физических объектов в процессе свободного полета, без применения механических поддерживающих устройств, в том числе программного движения по заданной траектории и разделения (отделения) различных частей исследуемых объектов.

Бесконтактный метод аэродинамического моделирования позволяет устранить методическую погрешность экспериментов с применением механических поддерживающих устройств, обусловленную аэродинамической интерференцией.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский С.В. Теория и практика аэромагнитного моделирования (монография). СПб.: ГУАП, 1998. 140 с.
2. Демидов А.Н., Ландау Б.Е., Лившиц А.В. Магнитное центрирование поплавковых гироскопов. Л.: ЦНИИ "Румб", 1978. 87 с.
3. Groom Nelson J., Bloodgood V., Dale Jr. A Comparison of Analytical and experimental Data for a Magnetic Actuator: Technical Memorandum NASA/TM-2000-210328. Washington, September 2000. 34 p.

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

Материал поступил в редакцию 8.02.2001.

## DESIGN AND ALGORITHMIC METHODS OF IMPROVING DYNAMIC AEROMAGNETIC COMPLEXES

S. V. Bogoslovsky

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

In this paper the ways for achieving magnetic levitation of physical models of flight vehicles in a wind tunnel and some features of synthesis of the control algorithms as magnetic suspension power control algorithms are considered. The rule of technical and economic proportions is established which is recommended for use when planning the updating of research complexes.