

УДК 629.7.054 : 533.6

© С. В. Богословский

ДИНАМИЧЕСКИЙ АЭРОМАГНИТНЫЙ КОМПЛЕКС КАК ВНЕШНЯЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Обсуждаются принципы проектирования динамических аэромагнитных исследовательских комплексов, позволяющих с использованием внешнего наблюдения и управления идентифицировать основные параметры движения транспортных средств различного базирования (космос, воздух, море, земля). Получены соотношения, позволяющие выполнить эскизное проектирование аэромагнитного комплекса. Рассмотрены структурные схемы аэромагнитного комплекса, результаты статических и динамических испытаний лабораторной установки.

Существует ряд сложных измерительно-управляющих комплексов (например, морского, авиационного и космического базирования), основной особенностью которых является использование внешних (зондирующих) методов получения информации и внешних (но отношению к объекту) управляющих сил. Учитывая существенные особенности исследования и проектирования таких комплексов, в частности необходимость решения задач в реальном времени, в условиях неполной информации и опосредованного характера управляющих воздействий, их можно выделить в отдельную группу и назвать *внешними* измерительно-управляющими комплексами.

В аэромагнитном комплексе для управления используется внешний (по отношению к ферромагнитному основанию исследуемой физической модели) источник управляющего электромагнитного поля. При этом управляющая моделью сила является распределенной по объему ферромагнитного основания модели, подвешенной в магнитном поле. В измерительно-управляющем аэромагнитном комплексе для получения информации используются не только внешний источник зондирующего излучения, но и опосредованная зависимость параметров движения объекта–цели от внешних (магнитных) управляющих сил.

Такой подход близок к концепции идентификации, сформулированной Заде как «определение по входу и выходу системы из определенного класса систем, которой испытываемая система эквивалентна» [1]. Опыт создания измерительно-управляющей системы аэромагнитного комплекса [2] может быть использован и при создании других внешних измерительно-управляющих систем. В настоящей работе приводятся принципы конструирования аэромагнитных комплексов.

1. АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЭРОМАГНИТНОГО КОМПЛЕКСА

Появление аэромагнитных комплексов вызвано наличием аэродинамической интерференции между механическими поддерживающими устройствами и физической моделью транспортного средства (ТС) при проведении испытаний. Это приводит к искажению структуры потока (поля скоростей и давлений) в непосредственной близости от поверхности физической модели и, как следствие, к появлению погрешностей при определении аэродинамических, акустических, тепловых и других характеристик в процессе статических испытаний. Дополнительные погрешности, обусловленные наличием шарнирного узла, появляются при проведении динамических испытаний моделей, в ходе которых оценивается устойчивость движения ТС. Единственной возможностью ликвидации указанных погрешностей является отказ от использования механических поддерживающих устройств.

Кардинальным путем решения этой проблемы является реализация бесконтактного подвеса моделей на основе магнитной левитации модели с ферромагнитным основанием в пределах рабочей части аэродинамической трубы (АДТ) [3].

Функциональная схема аэромагнитного комплекса [2] представлена на рис. 1.

Основными элементами аэромагнитного комплекса являются:

- система соленоидов;
- модель ТС с несущим основанием, взаимодействующим с магнитным полем соленоидов;
- рецепторная система;
- система управления комплексом;
- усилительные и исполнительные элементы.



Рис. 1. Функциональная схема аэромагнитного комплекса. ЛПР — лицо, принимающее решения, АДТ — аэродинамическая труба

Магнитная система подвеса представляет собой совокупность определенным образом расположенных соленоидов и ферромагнитного основания модели. Специфика аэромагнитного комплекса состоит в том, что геометрические параметры подвешиваемого тела (модели) должны быть на один–два порядка меньше диаметра АДТ.

Аэромагнитный комплекс при аэродинамических испытаниях должен осуществлять устойчивую стабилизацию модели в заданном пространственном положении и программное перемещение одной или нескольких моделей, точно идентифицировать кинематические параметры модели, обладать достаточной жесткостью, чтобы исключить влияние случайного перемещения модели на структуру аэродинамического потока.

Схема расположения информационных и управляющих элементов аэромагнитного комплекса [2] приведена на рис. 2. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 — аэродинамическая труба; 2 — осевые соленоиды; 3 — боковые соленоиды; 4 — источники излучения; 5 — датчики положения; 6 — ферромагнитное основание; X , Y , Z — аэродинамические и гравитационные силы; F_x , F_y , F_z — силы магнитного взаимодействия;

ИВК — информационно-вычислительный комплекс. Условия «парения» модели: $X = F_x$; $Y = F_y$; $Z = F_z$.

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

На начальных этапах проектирования с целью получения ориентировочных оценок частотных свойств магнитного подвеса можно воспользоваться формулой $W_{\max} = \omega^2 X_A$, где W_{\max} — максимальное ускорение подвешенной модели; ω — угловая частота контура стабилизации; X_A — амплитуда колебаний подвешенной модели в режиме стабилизации.

В общем случае максимальная частота контура стабилизации может быть увеличена до сотен герц. Максимальная частота ограничивается потерями в материале обмотки, ферромагнитном сердечнике и элементах конструкции, но в первую очередь — параметрами источников питания. При использовании стандартного тиристорного источника питания это ограничение составляет около 20 Гц.

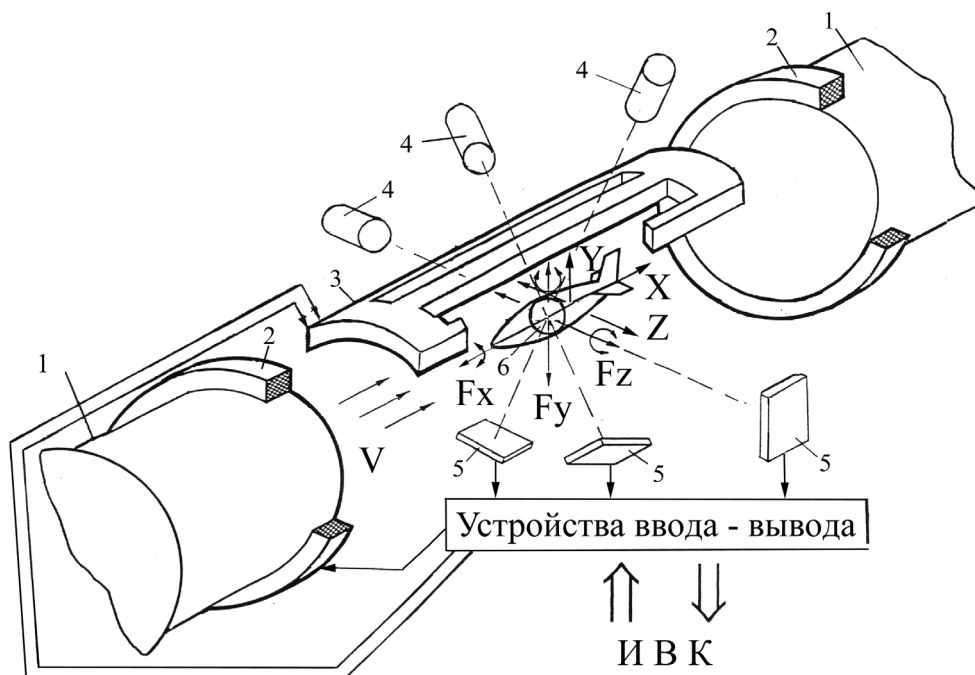


Рис. 2. Схема расположения элементов аэромагнитного комплекса. Условия «парения» модели: $X = F_x$; $Y = F_y$; $Z = F_z$; X, Y, Z — аэродинамические силы; F_x, F_y, F_z — силы магнитного взаимодействия; 1 — аэродинамическая труба; 2 — осевые соленоиды; 3 — боковые соленоиды; 4 — источники излучения; 5 — датчики положения; 6 — ферромагнитное основание

Допустимая величина амплитуды колебаний подвешенной модели при фиксированных величинах токов в катушках зависит, главным образом, от размеров и конфигурации магнитной системы. Реально для аэромагнитного комплекса с диаметром рабочей части 0.5 м эта величина находится в пределах 0.5–1.0 см.

Магнитный подвес АДТ состоит:

из кольцевой осевой катушки продольного поля, охватывающей АДТ,

и четырех прямоугольных боковых катушек, которые надеты на концы двух П-образных магнитопроводов.

Магнитопроводы расположены над трубой под углом 90° друг от друга и симметрично относительно вертикальной продольной плоскости. Они имеют прямоугольное сечение и набираются из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0.35 мм, стянутых изолированными шпильками. Все катушки выполняются из медной ленты сечением $25 \times 1 \text{ мм}^2$, которая наматывается вместе со стеклотентой послойно в галеты с промазкой эпоксидным компаундом, а затем запекается.

Галеты охлаждаются воздухом. Поток воздуха создается осевым вентилятором, установленным сверху над боковыми катушками.

Боковые катушки немного удалены от АДТ так, что с боковой стороны, напротив модели, имеется наблюдательное окно размером $100 \times 300 \text{ мм}$. Элементами силовой структуры являются два огибающих трубу полухомута, связанные тремя продольными балками, на которых напротив модели под углом 120° установлены световые датчики положения модели. С целью уменьшения погрешности измерений катушки магнитного подвеса и датчики установлены на одной и той же жесткой силовой конструкции. АДТ и магнитный подвес имеют собственные опоры и механически не связаны между собой.

Исходные данные [4] для проектирования приведены в табл. 1.

Конструктивная схема [2] магнитного подвеса, соответствующая указанным исходным данным, приведена на рис. 3. Все силовые элементы изготовлены из нержавеющей стали. Полная масса установки составляет 2000 кг.

Табл. 1. Технические характеристики пятикатушечного магнитного подвеса

Площадь мишени модели, $\text{м}^2 \times 10^{-4}$	20	Катушки	
Максимальный угол атаки	$\leq 30^\circ$	осевая	радиальные
Максимальные силы, создаваемые магнитной системой и приведенные к центру масс модели, Н:	по продольной оси	Число катушек	1
		Число витков в катушке	880
	по вертикальной оси	Максимальный ток, А	100
		Потребляемая активная мощность, кВт	24
	по боковой оси	Масса меди М1, кг	1200

3. СОСТАВНАЯ МОДЕЛЬ

В зависимости от целей эксперимента и частоты протекающих процессов магнитопроводы могут быть шихтованными или монолитными.

В качестве материала физической модели может использоваться:

- постоянный магнит;
- сверхпроводник;
- ферромагнетик;
- композиция указанных материалов с немагнитными материалами, причем немагнитные материалы используются для обеспечения аэродинамического подобия ТС и его физической модели, а также в качестве оболочки для размещения в ней одного или нескольких магнитных элементов (рис. 4) [2].

В рассматриваемом проекте при всех допустимых состояниях системы индукция магнитного поля внутри ферромагнитного основания модели не превышает 1.5 Т, что в первом приближении позволяет считать постоянной магнитную проницаемость ферромагнитного основания. Расчеты индукции магнитного поля внутри ферромагнитного основания модели показали, что его поперечное сечение может быть сокращено приблизительно в три раза, т. е. могут использоваться полые формы основания.

Таким образом, ферромагнитное основание составной модели может иметь следующие конструкторские решения:

- монолитный ферромагнитный шар (несколько шаров);
- полый тонкостенный шар или немагнитный шар с тонким ферромагнитным напылением;
- брусок (цилиндрический, крестообразный и др.) из ферромагнитного материала;
- трубка из ферромагнитного материала;
- сверхпроводящий соленоид в специальном контейнере.

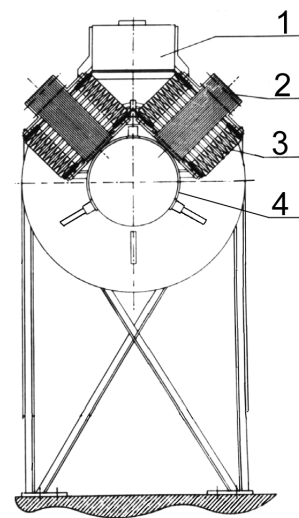


Рис. 3. Пятикатушечная схема магнитного подвеса. Обозначения: 1 — осевой вентилятор; 2 — магнитопровод; 3 — катушка боковая; 4 — аэродинамическая труба

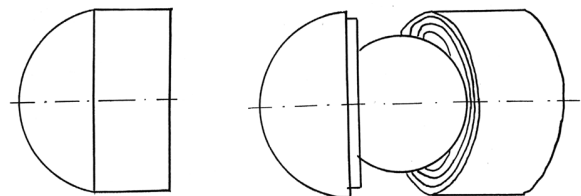


Рис. 4. Составная физическая модель

Для выбора конфигурации аэромагнитного основания можно воспользоваться следующими соображениями:

- собственная частота контура управления по данному каналу обратно пропорциональна корню квадратному из массы модели;

— для обеспечения пассивной стабилизации по крену основание модели может быть выполнено в виде прямоугольного бруска.

Выбор и оптимизация конфигурации аэромагнитного комплекса осуществляется на основе известных критериев оптимизации переходных процессов с учетом таких ограничений, как допустимый диаметр области устойчивости или допустимая величина перерегулирования.

4. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Проектирование магнитных подвесов для аэродинамических труб с повышенными техническими характеристиками (диаметр рабочей зоны, скоростной напор) возможно лишь при условии повышения необходимых значений электромагнитных сил, компенсирующих внешние (аэродинамические, гравитационные) нагрузки. При этом существенно возрастают требуемые значения токов силовых элементов. При плотностях токов выше 2 А/мм^2 происходит избыточный нагрев силовых элементов, а при плотностях токов более 20 А/мм^2 традиционные системы охлаждения становятся неэффективными.

Радикальным путем снижения эксплуатационных расходов (затрат на энергопотребление) является использование эффекта сверхпроводимости, т.е. создание «холодного» подвеса, в котором соленоиды и (или) основание модели охлаждаются до криогенных температур. В этом случае основанием модели служит не ферромагнитный сердечник, а сверхпроводящий соленоид, заключенный в криостат. Охлажденный соленоид может иметь магнитный момент на 70–80 % выше аналогичной величины у ферромагнитного сердечника, и для создания необходимых значений сил и моментов потребуются значительно меньшие токи соленоидов.

Криостат состоит из внутреннего ферромагнитного корпуса, который является каркасом соленоида, верхнего и нижнего фланцев, сваренных с внутренним корпусом. Для уменьшения теплопритока к внутреннему корпусу крепится ферромагнитный экран. Для уменьшения степени черноты на экран с двух сторон напылен алюминий. Центровка внутреннего корпуса относительно наружного осуществляется фланцем и тремя растяжками. После заливки во внутренний корпус жидкого гелия полость между обоими корпусами продувается газообразным азотом и откачивается до остаточного давления 1 мм рт. ст.

5. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ И ЗАЩИТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Система питания и защиты предназначена для подачи напряжения на каждую из обмоток маг-

нитной системы, поддержания силы тока на заданном уровне в течение длительного периода времени, а также для надежной защиты электрооборудования в случае возникновения аварийных и нештатных ситуаций.

Регулирование тока в каждой обмотке должно осуществляться в диапазоне от 60 А до 100 А с частотой до 15 Гц.

Частота регулирования выпрямленного напряжения преобразователя непосредственно связана с частотой питающего напряжения. При частоте напряжения питания 50 Гц величина выпрямленного напряжения преобразователя может быть изменена от максимального значения одной полярности до максимального значения другой полярности не менее чем за 10 мс.

В случае необходимости изменения полярности тока в какой-либо обмотке в течение одного цикла работы установки в цепи питания соответствующей обмотки можно использовать реверсивный тиристорный агрегат. В качестве реверсивных источников питания могут быть использованы тиристорные агрегаты серий ТИР и ТПР необходимой мощности. Основу силовой части таких агрегатов составляют два встречно-параллельно включенных трехфазных мостовых выпрямителя.

При использовании нереверсивного мостового преобразователя в каждой обмотке магнитной системы возможно одно направление протекания тока, в то время как выпрямленное напряжение может иметь как положительное, так и отрицательное значения (в зависимости от полярности сигнала, поступающего на тиристорный преобразователь из системы управления).

Например, в качестве источника питания каждой обмотки можно использовать шестиимпульсный мостовой тиристорный преобразователь, подключаемый к сети через анодный трансформатор. Для питания каждой из первых четырех обмоток предлагается использовать тиристорный преобразователь мощностью порядка 60 кВт, для питания пятой обмотки — преобразователь мощностью 70 кВт. Существующие тиристорные преобразователи серий ТП и ТS по мощности удовлетворяют этим требованиям. Основу силовой части этих агрегатов составляет шестиимпульсный мостовой преобразователь.

С ростом плотностей токов существенно возрастает установочная мощность системы энергопитания подвеса, достигая значений 10 и более мегаватт. В этих случаях необходимо создание специальных источников питания, обладающих одновременно достаточным быстродействием, себестоимость таких источников может составить до 60 % себестоимости всех работ по проектированию и созданию аэромагнитных комплексов.

6. СИСТЕМА ВНЕШНЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ

Рецепторная система аэромагнитного комплекса состоит из датчиков токов и системы определения пространственного положения модели в рабочей области АДТ. В силу того что обработка всей информации осуществляется на ЭВМ, в качестве датчиков токов используются быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

При разработке системы определения пространственного положения модели рассматривались следующие варианты технических решений: голографические системы, радиолокационные системы, телевизионные системы, в том числе с использованием датчиков и фильтров (муаровой техники, мультисканов [5], линеек фотодиодов в видимом диапазоне; линеек фотодиодов в ультрафиолетовом диапазоне).

Основным недостатком большинства из указанных систем является наличие серьезных проблем при работе с телами сложной геометрии, например, снабженных крыльями. Для решения этой проблемы можно использовать световозвращающие отражатели (катафоты), закрепленные на поверхности модели вблизи центра тяжести. Для определения координат объекта три световозвращающих отражателя должны быть закреплены на его поверхности под углом 120° между собой в плоскости, перпендикулярной к продольной оси тела и проходящей через его центр тяжести. В случае применения ультрафиолета катафот изготовляется из алюминиевых сплавов.

Таким образом, в качестве рецепторной системы определения пространственного положения модели (три линейных координаты центра масс и три угла Эйлера) наиболее предпочтительной представляется линейная оптическая система, схема которой приведена на рис. 5. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 — источник излучения; 2 — модель; 3 — ферромагнитное основание или катафот; 4 — изображение; 5 — линейка фотодиодов или мультискан.

Излучение от источника падает на модель и на катафот, установленный на поверхности модели. Отраженное от катафота излучение создает изображение — светотеневой перепад на приемной части рецепторной системы. Положение границы светотени регистрируется линейками фотодиодов или мультисканом.

По результатам измерений программным путем определяются шесть координат модели. Датчиками положения служат прецизионные многоэлементные фотоприемники типа «мультискан», использующие интегральное формирование выходного сигнала, что позволяет значительно повысить точность измерений. В описываемой системе кон-

троля мультискан используется совместно со щелевой диафрагмой, через которую ведется наблюдение. Отличительной особенностью фотоприемников типа мультискан является возможность слежения за модулированным источником света, не реагируя на медленно меняющиеся фоновые засветки, что в сочетании с последующим синхронным детектированием сигнала может обеспечить высокий уровень помехозащищенности. Термостабилизированный фотоприемник обеспечивает точность измерений ± 0.1 мкм. За пределами рабочей зоны АДТ под углом 120° расположены три набора фотоприемников типа мультискан. Ожидаемая погрешность определения любой из координат составляет не более ± 20 мкм.

Обобщая результаты исследований рецепторной системы, можно сделать следующие выводы:

- наибольший практический интерес представляют системы линейной оптики, основанные либо на фотодиодах в ультрафиолетовом диапазоне, либо на датчиках мультискан; к достоинствам этих систем следует отнести высокое быстродействие, высокую точность, инвариантность к тепловым воздействиям; кроме того, для излучения ультрафиолетового диапазона дифракция и связанные с ней искажения светотеневой картины находятся в приемлемом диапазоне;

- линейная оптика на фотодиодах в видимом диапазоне очень чувствительна к тепловому воздействию;

- рентгеновские системы не использовались в силу их вредного воздействия на экологию; несомненным достоинством рентгеновских систем, помимо высокой точности, является простота обработки результатов измерений, высокое быстродействие рецепторной системы, а также нечувствительность к характеристикам обычно применяемых материалов внешней оболочки модели.

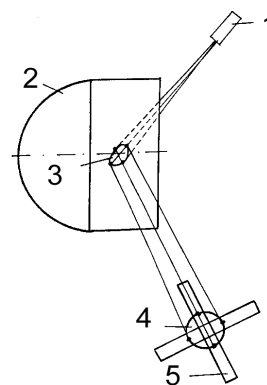


Рис. 5. Линейная оптическая система: 1 — источник излучения; 2 — модель; 3 — ферромагнитное основание или катафот; 4 — изображение; 5 — линейка фотодиодов или мультискан

Табл. 2. Расчет основных технических характеристик управляющей вычислительной машины (пояснения см. в тексте)

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение	Формула
1	Время ввода и сохранения одного набора входной информации, с	$T_B(N_d)$	$T_B(N_d) \leq T_3 / (N_d \cdot F_1)$
2	Погрешность дискретизации, %	δ_d	$\delta_d = 100 / 2^{Lr}$
3	Цена младшего разряда сигнала, В	δ_1	$\delta_1 = 2 A_s / 2^{Lr}$
4	Необходимый объем оперативной памяти, байт	$V_{озу}$	$V_{озу} = L_s \cdot T_3 / T_B(N_d)$
5	Время выполнения одного оператора управляющей программы (в среднем), с	T_{vy}	$T_{vy} = N_T / F_T$
6	Среднее число операторов, необходимых программе для выполнения идентификации в реальном времени и формирования сигнала внешнего управления	$N_{пр}$	$N_{пр} \leq F_T \cdot N_{vy} / (F_1 \cdot N_n \cdot N_T \cdot K_y)$

7. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ

Система управления аэромагнитного комплекса может быть реализована только на быстродействующей вычислительной технике (ВТ). Основные характеристики ВТ, используемой для обработки информации и управления, можно оценить по формулам, приведенным в табл. 2.

В табл. 2 приняты следующие условные обозначения: A_s — амплитуда сигнала; N_n — число независимо управляемых объектов; L_s — длина машинного слова; N_d — число датчиков, формирующих один набор информации; F_1 — частота дискретизации информации, поступающей с одного датчика; T_3 — время проведения эксперимента; F_T — тактовая частота процессора; N_{vy} — число наборов входной информации в пакете, одновременно обрабатываемом управляющей программой; N_T — среднее число тактов, необходимых для выполнения одного оператора управляющей программы; K_y — коэффициент запаса на выполнение команд управления; Lr — разрядность АЦП.

Анализ исходных данных позволил сделать вывод о том, что длина машинного слова должна составлять не менее двух байт ($L_s \geq 2$). Время проведения эксперимента обычно не превышает $T_3 = 10$ с.

Для повышения быстродействия при вводе входной информации перед АЦП необходимо включать устройство выборки—хранения (УВХ), которое позволяет запоминать мгновенное значение входного сигнала на время, составляющее для современных УВХ величину порядка нескольких десятков наносекунд независимо от величины запоминаемого сигнала.

Регулирующее воздействие системы управления обеспечивается цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП), требуемые параметры которых определяются при синтезе системы управления.

Как уже отмечалось, спецификой внешних измерительно-управляющих комплексов является неполнота информации о динамических характеристиках, необходимой для синтеза в реальном времени сигналов управления несколькими (не менее двух) объектами. Это вынуждает использовать в реальном времени мощный математический аппарат обработки сигналов (теорию фильтрации, теорию принятия решений, теорию идентификации и др.). В силу указанной специфики для внешних измерительно-управляющих систем лимитирующим параметром является допустимая длина ($N_{пр}$) управляющей программы.

Обычно частота дискретизации информации, поступающей с одного датчика, составляет не менее 200 кГц ($F_1 \geq 200 \times 10^3$), а величина N_{vy} даже при использовании нетрадиционных методов обработки малых статистических выборок не должна быть меньше 10.

При оценке ресурсов для реализации системы управления необходимо учитывать потери времени на пересылку дополнительных сигналов управления, вводя в расчеты коэффициент запаса K_y .

Принимая $F_T = 250$ МГц, $N_{vy} = 10$, $F_1 = 200$ кГц; $N_n = 4$ (для четырехкатушечной схемы); $N_T = 50$, $K_y = 1.5$, оценим допустимое число операторов программы, написанной на языке программирования Фортран: $N_{пр} = 41$.

При решении задач идентификации и управления аэромагнитными комплексами необходимо программное обеспечение, состоящее из нескольких тысяч операторов, что требует использования современных многопроцессорных серверов.

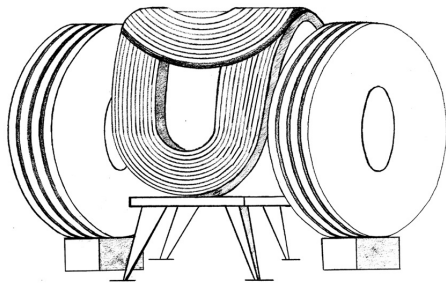


Рис. 6. Четырехкатушечная схема магнитного подвеса

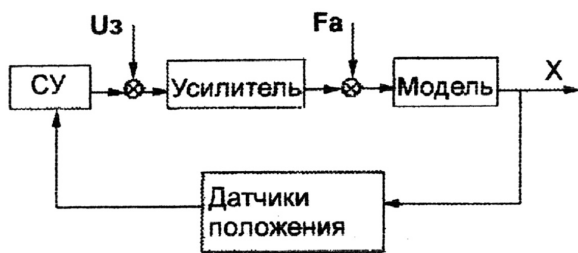


Рис. 7. Структурная схема динамических испытаний. Обозначения: СУ — система управления; U_z — задающее воздействие; F_a — вектор внешних сил; X — вектор выходных координат

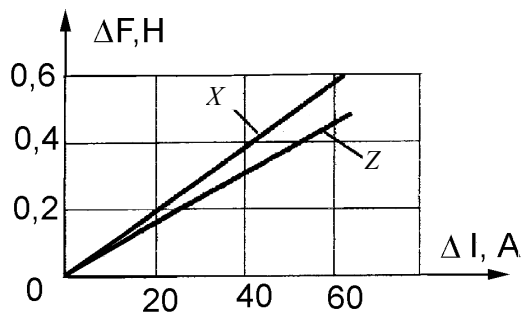


Рис. 8. Статические характеристики четырехкатушечной схемы магнитного подвеса

Исполнительными элементами системы управления являются усилители мощности. Могут быть реализованы следующие варианты усилителей мощности:

- тиристорные усилители, работающие в релейном режиме;
- транзисторные усилители, работающие в линейном режиме.

Существующая в настоящее время элементная база и схемно-конструкторские решения позволя-

ют создать усилитель мощности с требуемыми характеристиками.

8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изложенные выше принципы построения аэромагнитных комплексов опробованы при создании лабораторной аэромагнитной установки в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения (ГУАП).

Конструктивная схема установки [2] показана на рис. 6. Динамические испытания проводились в соответствии со структурной схемой (рис. 7).

Основные технические характеристики лабораторной установки: диаметр рабочей зоны — 0,5 м, скорость потока воздуха — 30 м/с, степень турбулентности воздуха — не более 3 %.

Были проведены статические и динамические испытания. В качестве тестовой модели использовался ферромагнитный шар диаметром 0,062 м и массой 0,46 кг. Результаты статических испытаний по продольному (X) и поперечному (Z) каналам представлены на рис. 8.

Отклонение от линейности статической характеристик составило не более 1 % от максимальной величины. При этом отклонение модели от начального положения равновесия не превышало 5×10^{-4} м.

В процессе динамических испытаний аэромагнитного комплекса были определены амплитудно-частотная характеристика (рис. 9) замкнутого контура стабилизации (рис. 7) и зависимость максимально допустимой амплитуды задающего сигнала от частоты (рис. 10).

Из рис. 9 следует, что спектральная характеристика аэромагнитного комплекса на частотах выше 6 Гц не превышает 30 % от максимального значения.

Снижение амплитуды задающего гармонического воздействия (рис. 10) вызвано необходимостью сохранения формы задающего сигнала при снятии частотных характеристик.

В программу испытаний эталонной модели входило и исследование влияния угла (ϵ) установки (0° , 45° , 90° относительно продольной оси) механического поддерживающего устройства (круглого стержня диаметром 14 мм из немагнитного материала) на точность измерения (рис. 11) и спектральную характеристику (рис. 12) аэродинамического коэффициента C_x силы лобового сопротивления.

Из рассмотрения рис. 11 следует, что наличие механического поддерживающего устройства может приводить к ошибкам (в данном случае — до 40%) в определении аэродинамических коэффициентов. Согласно рис. 12, спектр аэродинамических

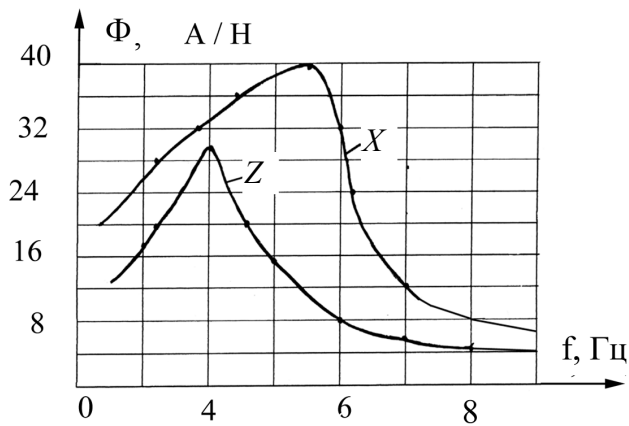


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики замкнутой системы стабилизации аэромагнитного комплекса

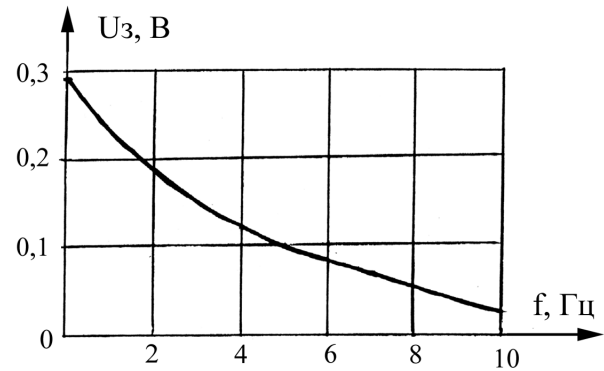


Рис. 10. Максимальные значения амплитуды задающего гармонического воздействия

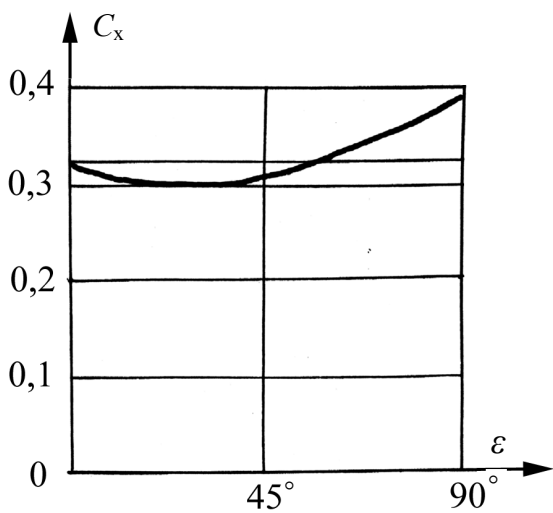


Рис. 11. Коэффициент силы лобового сопротивления

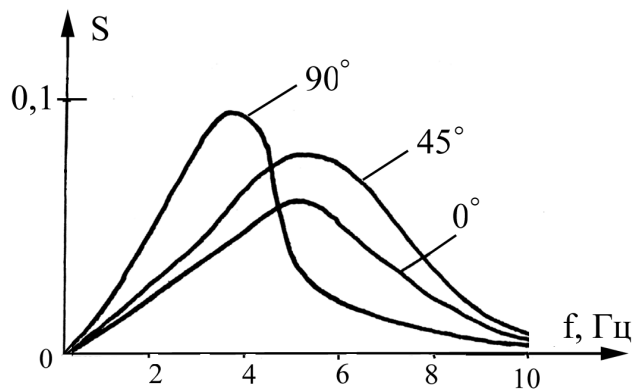


Рис. 12. Спектральная характеристика силы лобового сопротивления шара

сил при увеличении угла установки механического поддерживающего устройства до 90° еще больше смещается в низкочастотную область.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт исследований и макетирования в Санкт-Петербургском университете аэрокосмического приборостроения позволил сформулировать современную концепцию конструирования аэромаг-

нитных комплексов как разновидности внешних измерительно-управляющих систем. Основной особенностью аэромагнитных комплексов как внешней измерительно-управляющей системы является необходимость решения в реальном времени задачи идентификации динамических параметров одновременно нескольких объектов. Быстрота переходных процессов накладывает жесткие ограничения на число операторов, используемых в управляющей программе. Получены соотношения, позволяющие выполнить эскизное

проектирование основных блоков аэромагнитного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эйххофф П.* Основы идентификации систем управления: Оценка параметров и состояния. М.: Мир, 1975. 684 с.
2. *Богословский С.В.* Теория и практика аэромагнитного моделирования. СПб.: ГУАП, 1998. 140 с.
3. *Филиппов П.А.* Перспективы использования магнитного подвеса в аэродинамическом эксперименте // Задачи и методы экспериментальной аэродинамики: Сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Коробкова. СПб.: ГААП, 1994. С. 4–15.
4. *Филиппов П.А., Богословский С.В. и др.* Вопросы технической разработки магнитного подвеса для аэродинамических испытаний // Задачи и методы экспериментальной аэродинамики: Сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Коробкова. СПб.: ГААП, 1994. С. 15–26.
5. *Барковская К.Ф. и др.* Позиционно-чувствительный фотоприемник мультискан с высоким координатным разрешением // Научно-технические достижения. М.: ВИНТИ, вып. 2, 1992. С. 22.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Материал поступил в редакцию 27.05.2000.

DYNAMIC AEROMAGNETIC COMPLEX AS AN EXTERNAL MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEM

S. V. Bogoslovsky

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The principles of designing dynamic aeromagnetic research complexes using external supervision and external control for identification of the basic parameters of movement of vehicles of various basing (space, air, sea, ground) are discussed. The relationships allowing conceptual designing of the aeromagnetic complex are obtained. The block diagrams of the aeromagnetic complex, results of static and dynamic tests of the laboratory installation are considered.