

Глава V Методы моделирования

Различают следующие методы моделирования:

1. Математическое моделирование – такой метод исследования систем управления, который использует только математические модели.

а. Математическое моделирование называется динамическим, когда модели описывают только динамические свойства системы.

б. Математическое моделирование называют имитационным, когда временная последовательность событий в модели и реальной системе одинаковы.

2. Моделирование называется натурно-математическим (полунатурным), когда часть системы представлена ее реальной аппаратурой, а часть – математической моделью. Процессы в такой модели протекают в реальном времени. В этом смысле такое моделирование можно отнести к имитационному.

3. Виртуальное прототипирование – вариант имитационного натурно-математического моделирования.

Существуют два основных подхода к моделированию системы управления:

- эквивалентное моделирование – такое, когда модель системы строится по аналогии с ее структурой;

- модульное моделирование – такое, когда исходная система разбивается на физические модули (декомпозиция). Затем производится идентификация моделей каждого модуля. На основании результатов идентификации осуществляется математическая «сборка» полученных моделей в систему. После чего осуществляется математическое моделирование, но по реальным данным.

§ 1. Особенности математического моделирования.

Эффективность математического моделирования, естественно, в значительной мере зависит от адекватности используемых моделей реальной системы. Однако, результаты моделирования также могут существенно зависеть и от реализации этих моделей в той или иной инструментальной среде.

В общем случае модель динамической системы можно описать дифференциальным уравнением вида:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 x,$$

где y – выходной сигнал системы, x – входной.

В процессе моделирования системы надо исследовать решение уравнения $y(t)$ в зависимости от ее параметров, представленных коэффициентами уравнения и от входного воздействия $x(t)$. Практически надо провести интегрирование этого уравнения.

Поскольку реально осуществляется интегрирование в цифровом виде, то возникают две задачи:

1. Выбор числа разрядов n квантования по уровню.

Пусть сигнал $x(t)$ имеет максимальное значение A_{max} , а минимальное значение, которое надо обеспечить A_{min} .

Тогда

$$\frac{A_{max}}{A_{min}} = \frac{2^n}{2^1} = 2^{n-1},$$

$$\log A_{max} - \log A_{min} = n - 1,$$

$$n = \log A_{max} - \log A_{min} + 1.$$

2. Выбор интервала T , дискретного по времени.

Возможно, интервал T влияет на устойчивость решения задачи.

Как отмечалось ранее, интервал дискретности T есть чистое запаздывание по времени. Его передаточная функция $W(S) = e^{-ST}$, амплитудная частотная характеристика $A(\omega) = 1$, фазовая $\varphi(\omega) = -\omega T$.

При исследовании систем управления об их устойчивости судят по величине запаса устойчивости по фазе, определяемой по амплитудной и фазовой частотным характеристикам разомкнутой системы на частоте среза ω_0 .

Этот запас устойчивости по фазе желательно иметь не менее $\varphi_3(\omega) = 30^\circ$. Естественно, что при наличии интервала на частоте ω_0 , будет уменьшение запаса на $\varphi_{\text{зап}}(\omega_0) = -\omega_0 T$.

Пусть допустимое уменьшение запаса устойчивости будет $\varphi_{\text{зап}}^{\text{д}} = 0,1 \text{ рад.}$, $a\omega_0 = 10 \text{ рад/с}$, тогда допустимый интервал

$$T \leq \frac{\varphi_{\text{зап}}^{\text{д}}}{\omega_0} = 0,1 \text{ с.}$$

Реальные системы управления обычно подвергаются случайным воздействиям, т.е. $x(t)$ – есть реализация некоторого случайного процесса $x(t)$. Тогда при оценке точности работы системы необходима совокупность реализаций процесса управления и, соответственно, при этой оценке используется метод Монте-Карло.

В этом случае нужно уметь правильно задать параметры случайного процесса при его моделировании с использованием программы случайных чисел. Как это сделать.

Пусть программа случайных чисел генерирует их с интервалом времени Δt . Тогда по теореме Котельникова можно определить граничную частоту спектра с равномерной полосой, равную

$$\omega_{\text{гр}} = \frac{\pi}{\Delta t},$$

и спектральную плотность с уровнем

$$\frac{c^2}{2\pi},$$

где c^2 - уровень спектральной плотности.

Дисперсия этого процесса будет равна

$$\sigma^2 = \frac{c^2}{2\pi} \cdot 2\omega_{\text{гр}} = \frac{c^2}{\pi} \cdot \omega_{\text{гр}} = \frac{c^2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{\Delta t} = 1,$$

т.к. генерируемый процесс имеет дисперсию $\sigma^2 = 1$.

Тогда уровень спектральной плотности «белого» шума будет

$$c^2 = \Delta t.$$

С помощью формирующего фильтра можно генерировать случайный процесс с желаемой спектральной плотностью.

Обычно при математическом моделировании систем управления широко используются стандартные программные системы Матлаб, МВТУ и т.п. В качестве вычислительной среды при моделировании могут использоваться универсальные ЭВМ.

§ 2. Натурно-математическое (полунатурное) моделирование

Особенностью натурно-математического моделирования является то, что процессы обработки информации и управления протекают в реальном времени, а для физических элементов системы, входящих в состав модели, необходимо создавать условия, аналогичные условиям функционирования в реальной среде. Это достигается с помощью привлечения инструментальных средств, имитирующих пространственное движение, взаимодействие цели и объекта управления, нагрузочных стендов, имитаторов пространства цели и т.п. Существенным является также то, что при таком моделировании появляется возможность отработки и верификации функционального программного обеспечения, реализованного на управляющих вычислительных машинах.

По сути дела, для моделирования систем управления необходимо создание комплексов натурно-математического моделирования (КНММ), являющихся сложным инструментом, позволяющим исследовать и оценивать качество и точность работы системы управления в реальном времени.

В качестве примера построения КНММ обратимся к схеме, приведенной на рис. 44



Рисунок 44 – Схема комплекса натурно-математического моделирования

На этом рисунке показано следующее:

Реальная аппаратура САУ (радиолокационная, тепловая и др.; головки самонаведения, датчики углов поворота по тангажу ϑ , курсу Ψ и крену φ , и их угловых скоростей и т.п.), размещенная на трехступенном динамическом стенде, который управляется с помощью приводов 1, 2, 3 сигналами, формируемыми в математической модели ЛА. Сигналы, поступающие от реальной аппаратуры в БЦВМ, обрабатываются и, в соответствии с законом управления, вырабатывается управление u , которое реализуется рулевым приводом (угол поворота руля δ). Для создания нагрузки на руль используется нагрузочный стенд, управляемый сигналами, формируемыми в модели для имитации шарнирного момента и т.п. В КНИИ инструментально реализуется взаимодействие информационных средств реальной аппаратуры ЛА с целью. Относительное движение объекта управления и цели

имитируется с помощью двухстепенного угла цели. Управление узлом цели происходит из-за решения задачи наведения в математической модели уравнений связи. КНММ должен быть автоматизирован. Для этого в схеме на рисунке 35 имеется вычислительный блок управления КНММ с аппаратурой регистрации и обработки информации.

§ 3. Компоненты КНММ и требования к ним

Здесь мы рассмотрим некоторые компоненты КНММ и определим требования к ним.

I. Радио безэховое помещение.

Это помещение предназначено для размещения в нем радиолокационной аппаратуры самонаведения (головки самонаведения), установленной во внутреннем кольце трехстепенного динамического стенда и узла цели, представляющего излучатель радиолокационного сигнала и перемещающегося по вертикали и горизонтали по направляющим с помощью соответствующих приводов. Трехступенной стенд и узел цели размещаются на противоположных сторонах помещения по его длинной стороне L .

Это помещение должно удовлетворять следующим требованиям. Задача этого помещения состоит в том, чтобы обеспечить условия существования радиолокационного сигнала в нем, близкие к свободному пространству. Соответственно, для обеспечения плоского фронта волны длина помещения L должна быть $L \geq 30D$ тридцати диаметров антенны радиолокатора. Ширина b и высота h определяются с одной стороны возможностью радиопоглощающего материала и сохранением формы основного лепестка. Для реальных помещений при сантиметровом диапазоне волн эти размеры помещения могут быть: $L=50\text{м}$, $b=30\text{м}$, $h=20\text{м}$.

При этом все помещение должно быть радио непроницаемым (стальная коробка) и отделано поглощающим материалом с затуханием $-30 \div -40\text{дб}$.

В этом помещении должно быть обеспечено системами пожаротушения, дымогазоудаления и кондиционирования. Фрагмент такого помещения приведен на рис. 45.

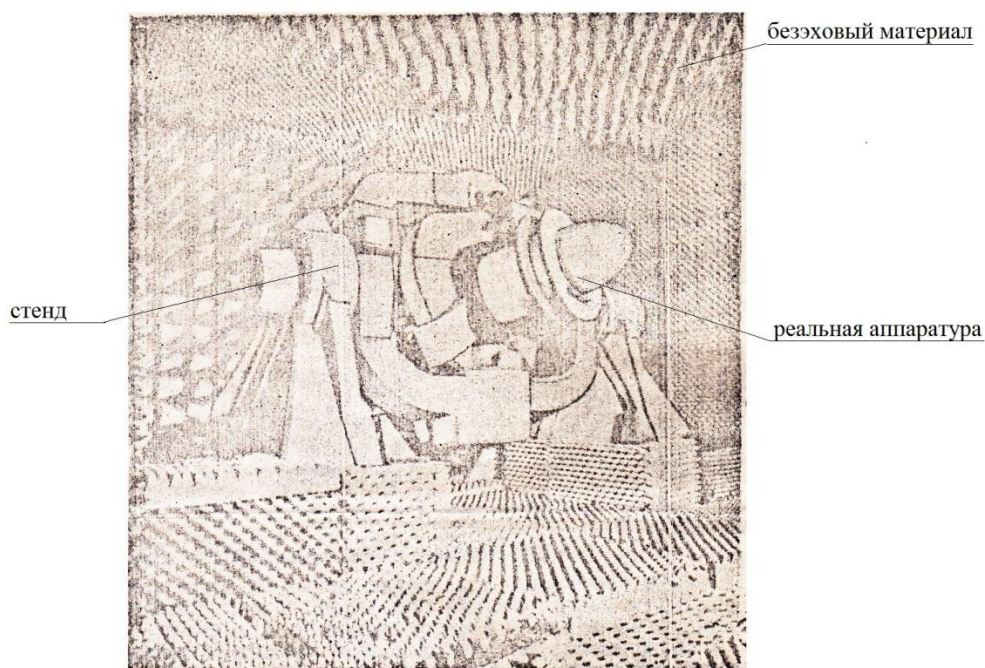


Рисунок 45 – Стенд с тремя степенями свободы
в безэховом помещении

II. Динамические стенды.

Динамические стенды предназначены для имитации углового движения ЛА в пространстве. Они могут иметь одну, две, три и пять степеней свободы в зависимости от назначения.

Общий вид трехстепенного динамического стенда отечественной разработки 60-х XX века показан на рис.46.

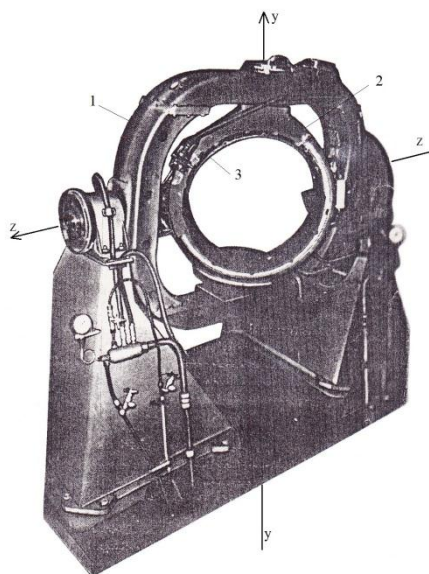


Рисунок 46 – Трехступенной динамический стенд

На этом рисунке можно видеть: 1 – внешняя рамка, которая может поворачиваться вокруг оси Z-Z и имитировать, соответственно, движение ЛА по углу тангажа; 2 – внутренняя рамка, расположенная внутри рамки 1, которая может вращаться вокруг оси Y-Y и тем самым имитировать движение ЛА по курсу. И, наконец, 3 – кольцо, вращающееся внутри рамки 2 и имитирующее движение ЛА по крену. Каждая рамка и кольцо приводятся во вращение следящей системой с помощью электрического или гидравлического привода.

Поскольку стенд, во внутреннем кольце которого размещается реальная аппаратура системы управления, требуется, чтобы полоса пропускания следящих систем не влияла существенно на динамику контура управления в целом. Другими требованиями к стендам являются также грузоподъемность, статическая и динамическая точность.

На рис. 47 показан общий вид современного трехступенного динамического стенда фирмы Acutronic.

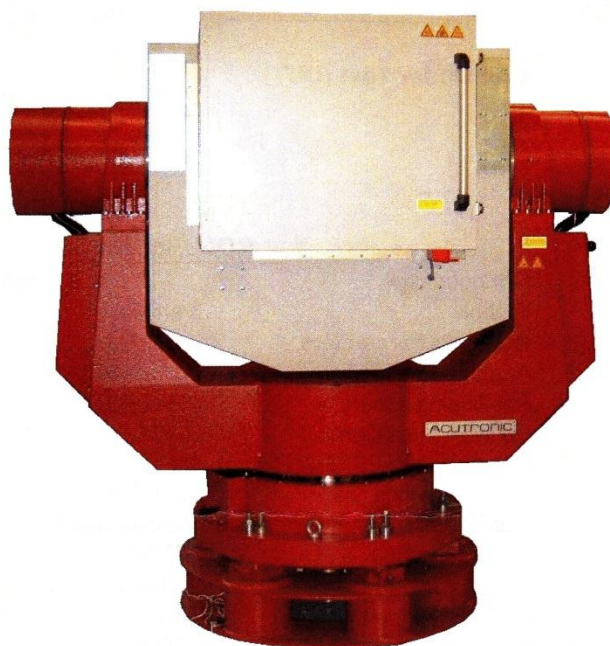


Рисунок 47 – Общий вид трехстепенного динамического стенда
фирмы Acutronic

III. Имитаторы сигналов и помех.

При натурно-математическом моделировании приходится имитировать относительное движение цели и объекта управления в пространстве. Поскольку динамический стенд имеет стационарное расположение, относительное движение реализуется за счет двухстепенного узла цели, который представляет собой генератор отраженного от цели радиолокационного сигнала.

В последнее время стали создаваться электронные имитаторы цели, представляющие собой некоторую матрицу, в узлах которой размещаются излучатели. Они управляются вычислительной машиной по плоскости матрицы, имитируя взаимное перемещение цели и объекта управления, а также по изменению мощности излучения и по фазе с помощью аттенуаторов и фазовращателей.

Кроме того, при моделировании используются генераторы искусственных и естественных помех.

IV. Нагрузочные стенды.

Предназначены для создания механических усилий и моментов, позволяющих имитировать воздействия на систему управления, возникающих в реальных условиях эксплуатации.

Как правило, нагрузочный стенд представляет собой следящую (замкнутую) систему, управляющую от сигналов вычислительной среды КНММ. Требованием к таким следящим системам является то, что ее быстродействие должно быть выше, чем быстродействие рулевого привода, создающего с помощью органов управления аэродинамический момент.

V. Вычислительные средства КНММ являются той его частью, которая обеспечивает системную организацию и управление всеми его компонентами – с одной стороны, с другой – быть эмулятором вычислительной машины, входящим в контур системы управления. Требования к объему памяти и быстродействию вычислительной среды определяются составом алгоритмов, реализуемых в этой среде. Затем, что в связи с увеличением возможностей вычислительной среды становится реальным создание виртуальных прототипов систем управления объектами различного типа.

В целом, комплекс натурно-математического моделирования является инструментом, позволяющим измерять и оценивать протекание процессов при моделировании реальных систем управления.

§ 4. Моделирование систем «человек-машина»

Моделирование человеко-машинных систем управления отражает новое качество по сравнению с моделированием автоматических систем управления, поскольку наряду с динамикой их компонентов появляется необходимость моделирования восприятия информации, ее распознавания, принятия решения об управлении и его реализации, осуществляемое человеком-оператором (коллективом людей). Суть проблемы состоит в построении модели деятельности человека-оператора в достаточной мере адекватной действиям реального человека. В большинстве источников

деятельность человека-оператора рассматривается как процесс слежения за тем или иным изображением, представленным на экране дисплея, т.е. слежения по зрительному каналу восприятия. Однако такая система управления функционирует в окружающей среде и, соответственно, испытывает ее воздействие. Одним из таких воздействий является вибрация.

Проблемы моделирования систем «человек-машина» достаточно полно изложены в учебном пособии А.Д.Устюжанина, К.А. Пупкова «Динамическая идентификация и оценивание характеристик человека-оператора в системах «человек-машина». Изд. РУДН. – 2011.

§ 5. Критерии эффективности моделирования.

Можно показать следующие критерии эффективности моделирования:

1. Эффективность моделирования. Этот критерий можно применить, используя лишь результаты натуральных испытаний, а именно:

$$\text{Э}_m \% = \frac{N - n}{N} 100\%,$$

где N - число обрабатываемых параметров системы при моделировании,

n – число параметров, измененных по результатам натуральных испытаний.

2. Глубина моделирования - λ .

Этот показатель имеет экономический характер. Показатель $\lambda = 1$ соответствует полностью отработанной системе. Этого показателя, в принципе, можно достигнуть только экспериментально, либо только с помощью моделирования. Рассмотрим структуру затрат на отработку системы, показанную на рис. 48.

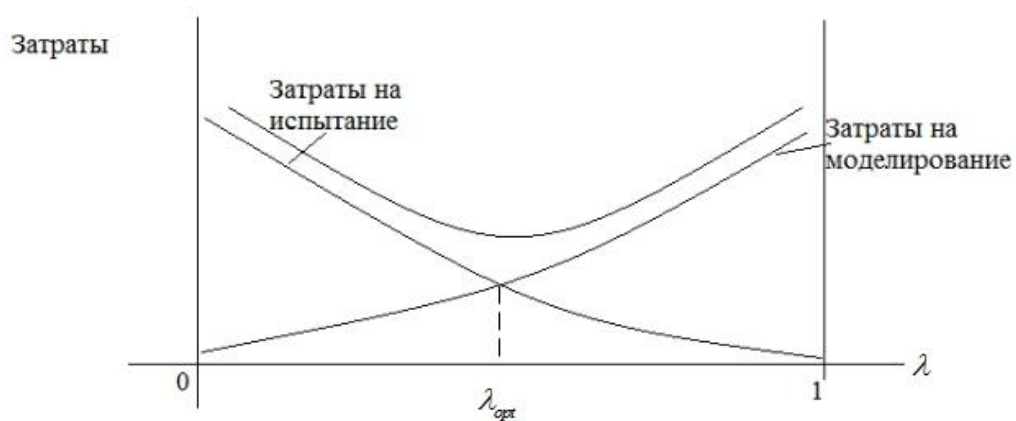


Рисунок 48 – Структура затрат на моделирование и натурные испытания

Из рисунка видно, что существует некоторое оптимальное значение глубины моделирования - $\lambda_{\text{опт}}$. Для реальных случаев это значение может составить $\lambda_{\text{опт}} = 0,6 \div 0,7$.