

УДК 62.001.4:62-501.72

# РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ И ДИАГНОСТИКИ УСТРОЙСТВ НАВИГАЦИИ

**В.В. Воробьев**

*Тульский государственный университет*  
Россия, 300012, Тула, Ленина проспект, д. 92  
E-mail: [info@sau.tsu.tula.ru](mailto:info@sau.tsu.tula.ru)

**О.В. Горячев**

*Тульский государственный университет*  
Россия, 300012, Тула, Ленина проспект, д. 92  
E-mail: [info@sau.tsu.tula.ru](mailto:info@sau.tsu.tula.ru)

**А.Г. Ефромеев**

*Тульский государственный университет*  
Россия, 300012, Тула, Ленина проспект, д. 92  
E-mail: [info@sau.tsu.tula.ru](mailto:info@sau.tsu.tula.ru)

**О.О. Морозов**

*Тульский государственный университет*  
Россия, 300012, Тула, Ленина проспект, д. 92  
E-mail: [info@sau.tsu.tula.ru](mailto:info@sau.tsu.tula.ru)

**Ключевые слова:** система навигации, стенд, силовой привод, программное управление, критерий, точность, синтез, динамические испытания, диагностика

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы развития методологии лабораторно-стендовых испытаний систем навигации с диагностикой показателей динамики и точности. Предложены конструкция стенда для испытаний блоков инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ) и прикладная методика экспериментальной отработки системы управления стенда с контролем диапазона динамической ошибки. Стенд и методика могут быть использованы при испытаниях широкого класса устройств ориентации и навигации.

## 1. Введение

Современные информационно-измерительные устройства ориентации и навигации включают такие устройства, как инерциальные системы, датчики, гироскопы, микро-электромеханические системы и др. Важным аспектом создания этих систем является совершенствование применяемого для испытаний оборудования в соответствии с постоянно повышающимися требованиями к динамике и точности. В связи с этим актуальным является развитие методологии создания прецизионных стендов, предназначенных для моделирования в реальном времени пространственных движений систем ориентации и навигации. Особенности разработки трехстепенного стенда (3-СТ) являются жесткие требования к точности воспроизведения угловых движений БИЧЭ летательного аппарата в широких диапазонах скоростей и ускорений, к точности измере-

ния координат, а также к плавности. Под плавностью здесь понимается отсутствие в спектре движений частотных составляющих, не характерных для движения изделия.

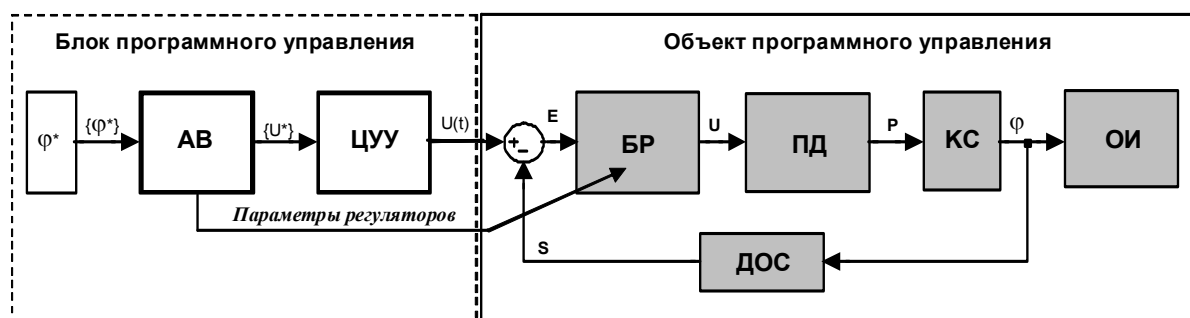
## 2. Синтез и обработка системы управления станда

Силовая система управления 3-СТ реализована на современной элементной базе:

– в канале вращения изделия по крену – на базе электродвигателя бесконтактного моментного серии ДБМ;

– в каналах угловых перемещений изделия по тангажу «медленному» – на базе электропривода постоянного тока; по тангажу «быстрому» и курсу – на базе двух пневматических приводов, которые собраны из стандартных элементов пневмоавтоматики. Управляющая и информационно-измерительная системы являются цифровыми микропроцессорными, реального времени. В состав станда, как система верхнего уровня, входит персональный компьютер (ПК).

Рассмотрим систему программного управления (СПУ), реализованную на базе двух силовых пневмоприводов. Она предназначена для воспроизведения программ пространственных движений платформы с БИЧЭ по углам тангажа и рыскания. Функциональная схема СПУ представлена на рис. 1. Программный закон движения задан аналитически, в частности, в виде синусоидальной функции.



**Рис. 1.** Функциональная схема СПУ: АВ – априорный вычислитель; ЦУУ – цифровое управляющее устройство; БР – блок регуляторов; ПД – пневмодвигатели; КС – кинематические соотношения; ДОС – датчики обратной связи; ОИ – объект испытания

На рис. 1 обозначено:  $\{\varphi^*\}$  – априори заданная информация о характере движения ОИ;  $\{U^*\}$  – сформированная в классе обратных задач динамики априорная информация о характере потребных воздействий на исполнительные подсистемы, позволяющая реализовать в станде заданную программу движения;  $U(t)$  – сигнальная реализация информации  $\{U^*\}$ ;  $E$  – сигнал ошибки;  $P$  – силовое воздействие;  $\varphi$  – реализация программного движения;  $S$  – сигнал обратной связи.

Для синтеза привода построены нелинейная и линеаризованная модели. При этом учтены основные факторы, влияющие на динамику и точность станда, такие как: широтно-импульсная модуляция (ШИМ) сигналов, дискретность регулятора, разрядность датчиков, трение в двигателе, ограниченность линейной зоны работы. В модели пневмопривода учтены изменения давления и температуры воздуха в рабочих полостях, изменения режимов течения через дросселирующие отверстия (критический, докритический). Параметры приводов рассчитаны на основе энергетического анализа по задан-

ным предельным значениям переменных, моменту инерции нагрузки и моменту сопротивления. Важным этапом создания 3-СТ является отработка в стенде высокоточных законов управления силовыми приводами.

Нелинейная модель пневмопривода строится с использованием законов тепломеханики систем с сосредоточенными параметрами [1]. На основе линеаризации с разложением функций правых частей уравнений в ряд в окрестности установившегося режима получена линейная модель для синтеза управления. БР реализован на базе ПД-регулятора. Синтез БР произведен известными методами линейной теории [2]. Для высокоточной СПУ закон управления синтезирован в классе обратных задач динамики [3]. Задатчик сигнала входит в состав блока программного управления (БПУ) (рис. 1). Передаточная функция (ПФ) задатчика имеет вид

$$(1) \quad W(p) = \frac{c_9 p^7 + c_8 p^6 + c_7 p^5 + c_6 p^4 + c_5 p^3 + c_4 p^2 + c_3 p^2 + c_2 p + c_1}{d_3 p^2 + d_2 p + d_1} + k_{oc},$$

где  $k_{oc}$ ,  $\{c_i\}$ ,  $\{d_j\}$  – действительные постоянные ( $i = 1, 2, \dots, 9$ ;  $j = 1, 2, 3$ ).

Информация о производных в числителе выражения (1) задается в явном виде в соответствии с тем, что закон движения задан аналитически. Рассмотрим вопрос формирования критерия точности для экспериментальной отработки СПУ в стенде. Ошибку СПУ обуславливают неучтенные в исходной модели физические явления, приближенность линейной модели, ШИМ, дискретность регулятора и датчиков, отклонения параметров от расчетных значений, помехи и шумы, сбои цифровых элементов и др. Актуальной задачей является настройка СПУ в стенде путем оптимизации коэффициентов ПФ (1) по критерию точности в режиме отработки программного закона.

В задачах синтеза следящих приводов, как правило, используют один из двух интегральных критериев точности, вычисляемых на отрезке времени наблюдения. В первом случае точность оценивается по среднему квадрату (СК) ошибки, во втором – по максимуму модуля ошибки [2, 4]. Средний по времени критерий никак не ограничивает мгновенное значение ошибки. Поэтому привод с хорошей «в среднем» точностью может иметь кратковременные выбросы в сигнале ошибки и даже срывы слежения. Достоинством критерия СК является то, что он просто рассчитывается по результатам статистических испытаний. Модульный критерий ограничивает мгновенное значение ошибки и тем самым гарантирует, что ошибка никогда не превысит величины критерия. Данный критерий позволяет контролировать диапазон ошибки, что наиболее хорошо отвечает задачам синтеза высокоточных систем. Однако, несмотря на практическую значимость, модульный критерий труден в вычислении.

В данной работе для отработки силовых приводов стенда 3-СТ предложен модифицированный критерий СК ошибки, вычисление которого с одной стороны практически не сложно, с другой – позволяет получить оценку диапазона ошибки.

В установившемся режиме СПУ должна воспроизводить медленно изменяющийся регулярный периодический сигнал в условиях широкополосных шумов датчиков при возможно меньших как СК ошибки, так и диапазоне ошибки. Рассмотрим случай, когда измерительная информация поступает от двух независимых датчиков скорости и ускорения, каждый из которых обладает своими статистическими характеристиками.

Значение СК ошибки вычисляется методом статистических испытаний за большое число периодов задающего сигнала на дискретном множестве  $N$  контрольных точек. Расчет потребного объема данных  $N$  выполняется исходя из обеспечения адекватной оценки СКО. Расчет выполнялся, исходя из высоких показателей точности оценки (среднее квадратическое отклонение оценки) и надежности (доверительная вероятность оценки). Как правило,  $N \geq 1000$ . Повышение надежности и точности оценки достигается увеличением времени наблюдения и количества регистрируемых точек.

На динамическую точность привода значительное влияние оказывает характер задающего воздействия, который определяется предельными значениями скорости и ускорения. В соответствии с этим в модифицированном критерии СК предложено учесть вариации уровня СК ошибки в зависимости от сочетаний модулей скорости и ускорения, т.е. учесть неоднородность структуры СК ошибки по отношению к разным областям фазовой плоскости (ФП) в переменных «скорость-ускорение» задающего сигнала. Рассмотрим прикладную методику отработки СПУ в стенде, предусматривающую синтез коэффициентов ПФ (1) по модифицированному критерию СК. Методика включает этапы.

Этап 1. Построение на ФП задающего сигнала в безразмерных переменных «скорость-ускорение» фазовой траектории (ФТ), соответствующей заданной программе изменения угла. При этом каждая точка ФТ показывает, как сочетаются в один и тот же момент времени значения скорости и ускорения.

На данном этапе выполняется нормализация переменных (времени, скорости, ускорения) для представления движений СПУ на плоскости безразмерных угловых скорости  $\dot{\varphi}$  и ускорения  $\ddot{\varphi}$  (рис. 2). Безразмерные переменные связаны с размерными через масштабные коэффициенты (базисные величины). Базисные по времени, скорости и ускорению определяются, соответственно, через известные частоту программного закона движения и максимальные уровни переменных.

Этап 2. Разбиение нормализованной ФП на области с различной динамической точностью СПУ. Целесообразно выделить следующие характерные области значений модулей скоростей и ускорений:

- область 1 «больших» скоростей и «малых» ускорений;
- область 2 «средних» скоростей и «средних» ускорений;
- область 3 «малых» скоростей и «больших» ускорений.

Предложенная структура ФП симметрична относительно осей координат, причем каждая из областей содержит по четыре тридцатиградусных сектора (рис. 2).

Этап 3. Регистрация сигнала ошибки и статистическая обработка данных, полученных при отработке программы на заданном отрезке времени в каждой из областей 1, 2, 3. При этом на множестве контрольных точек в выделенных областях рассчитываются соответствующие локальные СК ошибки, которые обозначим как  $S_1, S_2, S_3$ .

Этап 4. Оптимизация в пространстве коэффициентов ПФ (1) по модифицированному минимаксному критерию СК, а именно, по критерию минимума максимального из трех локальных СК. Формальная постановка задачи оптимизации имеет вид

$$(2) \quad \max_{\{S_1, S_2, S_3\}} (S_1(\boldsymbol{\beta}), S_2(\boldsymbol{\beta}), S_3(\boldsymbol{\beta})) = \min_{\boldsymbol{\beta}} \rightarrow \boldsymbol{\beta}^*$$

где  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  – вектор коэффициентов ПФ (1);  $\boldsymbol{\beta}^*$  – оптимальный вектор.

Решение задачи (2) означает, что в рабочей области скоростей и ускорений проявление динамических свойств СПУ в стенде близко к проявлению свойств её линейной модели, которая используется для синтеза управления. В случае не выполнения требования по точности, т.е. когда наибольшая из локальных среднеквадратичных ошибок (СКО) превышает допуск, производится итерационное возвращение на этап построения нелинейной и линейной моделей привода с целью их уточнения.

Предложенный модифицированный критерий (2) по сравнению с классическим критерием «близости в среднем» повышает эффективность синтеза и отработки высокоточных систем за счет дополнительной возможности оценивания диапазона ошибки.

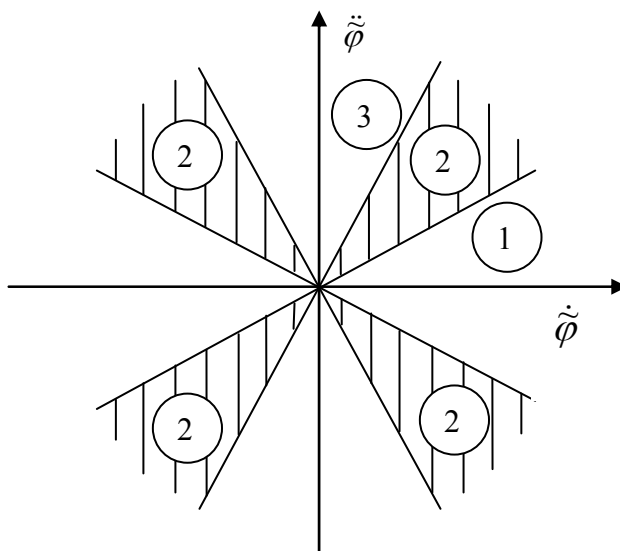


Рис. 2. Структура разбиения фазовой плоскости в координатах «скорость-ускорение».

Использование критерия (2) показывает, что СКО системы, вычисленные в характерных областях ФП, различны. Как правило, СКО больше в областях 1 и 3, т.е. в тех областях, где имеют место значительные разносы скорости и ускорения задающего сигнала. Это подтверждает адекватность предложенного минимаксного критерия (2).

### 3. Заключение

Разработан прецизионный стенд для испытаний и диагностики БИЧЭ. Предложена методика синтеза и отработки силовой системы стенда с использованием модифицированного критерия СК ошибки, который позволяет оценивать как точность «в среднем», так и диапазон ошибки. Стенд и методика могут быть использованы при испытаниях широкого класса устройств ориентации и навигации.

### Список литературы

1. Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И. Основы проектирования систем пневмо- и гидроавтоматики / Монография, М.: Изд. дом «Спектр», 2017. 459 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / Учебное издание. 4-е изд., перераб. и доп. СПб: Профессия, 2004. 752 с.
3. Анпилогов В.В. Тепло- и гидромеханические системы. Методы исследования / Уч. пособ. Тула: ТулПИ, 1991. 44 с.
4. Воробьев В.В., Макаров Н.Н., Парамонова А.А. Метод гарантированной точности для релейных следящих систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10. (127). С. 32-38.