

# МЕТОДИКА СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ

**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)

**Н.Н. Макаров**

*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 телеуправления, регулятор, критерий, точность, помехозащищенность, стенд, тестирующие сигналы, динамические испытания, диагностика.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы развития методологии лабораторно-стендовых испытаний систем телеуправления (СТУ), которые функционируют в условиях произвольных реализаций входного сигнала из заданного класса, а также воздействий подвижных световых помех и шумов аппаратуры. Предложена рациональная методика испытаний СТУ с диагностикой показателей точности и помехозащищенности. Методика позволяет экспериментально обрабатывать СТУ на заданном классе сигналов с контролем диапазона динамической ошибки при малом потребном объеме испытаний. Предлагаемый подход повышает эффективность разработки и испытаний высокоточных систем.

## 1. Введение

Лабораторно-стендовые испытания СТУ с диагностикой показателей динамики, точности и помехозащищенности используются на всех этапах их разработки: от НИОКР до производства и контроля готовой продукции. Полунатурные стенды позволяют перенести часть натуральных (полигонных) испытаний в лабораторные условия и тем самым снизить затраты времени и средств на разработку новых и модернизацию имеющихся изделий.

Для динамических испытаний командной оптико-электронной СТУ подвижного объекта используется полунатурный стенд, который представляет собой комбинированную (полунатурную) модель замкнутого контура управления. Он содержит штатную наземную аппаратуру управления (НАУ), а также физические и/или математические модели блоков СТУ (рулевого привода, объекта, кинематических соотношений, оптического канала связи, излучателя объекта, световых помех и др.).

В процессе испытаний на систему воздействуют типовыми тестирующими сигналами (ступенчатым, линейным, гармоническим и т.д.). Результаты диагностики с контролем точности в этом случае имеют локальный характер, так как производятся на узких классах регулярных сигналов. Статистические испытания СТУ предусматривают использование случайных воздействий. Оценки точности получают усреднением на множестве реализаций сигнала ошибки. Такие испытания требуют массовости экспериментов и, как следствие, характеризуются большой трудоемкостью и снижением ресурса изделия и стенда.

Отметим недостатки традиционного подхода к испытаниям динамических систем:

- используются усредненные оценки точности, т.е. не контролируется важный показатель качества – диапазон мгновенной ошибки, которая возникает в условиях случайного входного сигнала заданного спектра или сигнала произвольной формы из заданного класса регулярных сигналов;

- требуется большой объем экспериментов; при малом – не обеспечиваются требуемые точность и надежность оценок;

- снижается ресурс изделия и стенда при большом объеме испытаний.

Особенностью задачи испытаний СТУ является совместное воздействие на систему входного сигнала произвольной формы, внешних (естественных и/или организованных) подвижных «точечных» световых помех и шумов аппаратуры.

Подчеркнем достоинство метода полунатурного моделирования по сравнению с методом компьютерного моделирования. В процессе экспериментальной отработки СТУ стенд обеспечивает существенно более полное воспроизведение критических ситуаций в работе системы. Например, это ситуация, когда на участке подлета объекта к цели одновременно накладываются нескольких неблагоприятных факторов, таких как:

- размах колебаний объекта относительно линии прицеливания близок к предельному, который допустим по техническому заданию;

- в поле зрения НАУ находятся движущиеся «точечные» световые помехи;

- помехи характеризуются кинематикой движения и спектром излучения, которые близки к характеристикам объекта и его излучателя;

- интенсивность помех соизмерима или превышает мощность потока от излучателя объекта;

- высокий уровень шумов НАУ.

В связи с этим актуальной задачей при создании высокоточных СТУ, которые функционируют в условиях шумов, внешних подвижных световых помех и произвольного характера входного сигнала, является разработка полунатурного стенда и методики экспериментальной отработки, которые обеспечат надежный и адекватный контроль показателей динамики, точности и помехозащищенности системы.

## **2. Использование метода предельных отклонений при динамических испытаниях систем**

Точность СТУ может оцениваться отклонением объекта от линии прицеливания (оптической оси НАУ). В качестве критерия точности целесообразно использовать предельную ошибку на заданном классе входных сигналов. Такой подход позволяет при отработке СТУ контролировать диапазон мгновенной динамической ошибки. Далее будем считать, что известна спектральная плотность мощности случайного входного сигнала (ошибки сопровождения цели).

Метод предельных отклонений в настоящее время хорошо разработан для задач анализа и синтеза стационарных линейных и некоторых типов нелинейных сис-

тем [1, 2]. Для определения предельной на заданном классе сигналов  $V$  ошибки используется т.н. расширенная система (рис. 1). Вводится понятие ГТ – гарантированной точности следящей системы (СС), которая понимается как максимум модуля ошибки слежения  $e(t)$  за сигналами  $v(t)$  из класса  $V$  на заданном интервале времени  $T$ , который может быть и бесконечным

$$(1) \quad \Gamma(V, T) = \max_{v(t) \in V} \max_{0 < t < T} |e(t)|.$$

Критерий ГТ имеет ясный содержательный смысл. Это наибольшая ошибка наведения объекта, которая может возникнуть в зависимости от вида постановки задачи:

- в детерминированной – на заданном классе регулярных входных сигналов;
- в стохастической – на множестве реализаций случайного входного сигнала с заданной спектральной плотностью.

В общем случае для экспериментальной оценки ГТ используется расширенная система в виде виртуального и/или полунатурного стенда (рис. 1). Она содержит линейное задающее устройство (ЗУ), последовательно соединённое со СС. Причем вход ЗУ ограничен по уровню,  $|u_{3Y}| \leq 1$ , начальные условия нулевые. Определение структуры и параметров ЗУ производится известным методом по заданной спектральной плотности мощности входного сигнала [2].

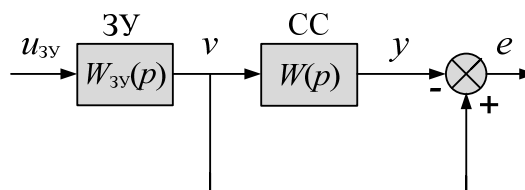


Рис. 1. Структурная схема расширенной системы.

Сигнал, который подается на вход ЗУ и разгоняет линейную стационарную СС по ошибке, имеет релейную форму:

$$(2) \quad u^0(t) = \text{sign}(w_{eu}(T - t)),$$

где  $w_{eu}(t)$  – весовая функция расширенной системы от входа ЗУ до выхода по ошибке,  $w_{eu}(t) = L^{-1}(W_{eu}(p))$ ;  $L$  – символ преобразования Лапласа.

В стенд входит блок формирования импульсов (БФИ), который формирует экстремальный тест-сигнал (2) на входе ЗУ. БФИ и ЗУ реализуются алгоритмически с помощью персонального компьютера (ПК) стенда. В процессе испытаний на входе СС формируется экстремальный гладкий сигнал  $v^*(t) \in V$ , который разгоняет систему до предельной ошибки, т.е. до ГТ. Значение ГТ зависит от класса  $V$  и длительности наблюдения  $T$ , а также от вектора параметров регулятора системы  $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ .

Заметим, что метод предельных отклонений разработан для линейных стационарных систем. В нашем случае, однако, как испытуемая система, так и ЗУ (см. звенья СС и ЗУ на рис. 1) являются существенно нестационарными, параметры их зависят от времени и, более того, могут изменяться скачком. Само понятие ГТ сохраняет смысл и в этом случае. Остаётся в силе и алгоритм её вычисления в случае линейной системы, поскольку он основан на использовании весовой функции системы, которая сохраняет смысл и для систем нестационарных.

Однако для нелинейных систем использование указанного алгоритма не имеет строго обоснования. Поскольку в стенде предполагается использование натуральных бло-

ков СТУ, которые не могут быть линейными, хотя и близки к линейным, и параметры которых точно не известны, в данной работе предлагается использовать модифицированный алгоритм. Суть его состоит в получении исходной разгоняющей функции по линейной модели системы с дальнейшей её оптимизацией путём малых вариаций моментов переключений.

### 3. Методика полунатурных испытаний и отработки СТУ

Рассмотрим рациональную методику статистических испытаний СТУ, которая позволяет контролировать диапазон динамической ошибки и показатель помехозащищенности системы при малом потребном объеме экспериментов. Методика предусматривает использование в стенде специальных, близких к экстремальным по критерию максимума ГТ, тестирующих сигналов из заданного класса  $v^*(t) \in V$ . Эти сигналы формируются ПК стенда и подаются на вход испытываемой СТУ. При этом на ПК моделируется часть расширенной системы, которая содержит последовательное соединение БФИ и ЗУ (рис. 1). Тест-сигналы формируются с использованием метода предельных отклонений. Эти сигналы обеспечивают накопление ошибки наведения объекта на заданных классе входных сигналов  $V$  и интервале времени.

Процесс испытаний предусматривает подачу от БФИ на вход ЗУ детерминированного релейного тест-сигнала вида (2) и регистрацию накопления динамической ошибки в условиях совместного действия шумов натурной НАУ и внешних световых помех, которые перемещаются по случайному закону. Расширенная программа испытаний СТУ с накоплением ошибки предусматривает использование трех типов тест-сигналов, которые подаются от БФИ на вход ЗУ:

- 1) детерминированного релейного сигнала типа I;
- 2) стохастического сигнала релейной формы типа II;
- 3) «типового входного случайного сигнала СС» типа III.

Детерминированный релейный сигнал I имеет вид (2). Он формируется по линейной модели системы, которую обозначим как M1. Стохастические сигналы второго и третьего типов формируются на основе сигнала I.

Случайный сигнал II имеет релейную форму. Причем длительности интервалов постоянства (интервалов между моментами переключения реле) образуют последовательность независимых случайных величин, которые подчиняются экспоненциальному закону распределения и имеют среднее значение, равное среднему интервалу постоянства сигнала I. Величина полки реле тест-сигнала равна максимально допустимому уровню сигнала на входе ЗУ. Случайный сигнал третьего типа формируется на базе среднего интервала постоянства сигнала I и представляет собой т.н. «типовой входной случайный сигнал» с равномерно распределенными уровнями постоянства [3].

Подход к испытаниям, основанный на совместном действии шумов аппаратуры, подвижных световых помех и накопления динамической ошибки позволяет воспроизвести наиболее жесткую из возможных ситуаций в работе СТУ. Причем наибольший размах колебаний объекта от линии прицеливания достигается именно на участке полета к цели, где наиболее критичны показатели точности и помехозащищенности.

Расширенная программа испытаний с использованием как традиционных, так и предложенных тестирующих сигналов повышает надежность и эффективность экспериментальной отработки СТУ. При этом для оценки диапазона мгновенной ошибки СТУ требуется меньший объем экспериментов.

Рассмотрим методику экспериментальной отработки регулятора СТУ, которую можно применять как в виртуальном, так и в полунатурном стендах. Тест-сигнал вида

(2), который получен по М1, характеризуется множеством  $T^0 = \{t_i^0\}_m$  моментов переключения (моментов смены знака). Будем использовать  $T^0$  в качестве начального приближения для определения моментов переключения тест-сигнала, который предназначен для точностных испытаний полунатурной модели системы, которую обозначим как М2. Цель точностных испытаний состоит в оценке с помощью стенда предельной ошибки М2 и коррекции на этой основе параметров регулятора в направлении ее уменьшения. Коррекция параметров регулятора СТУ сводится к задаче численной оптимизации по минимаксному критерию

$$(3) \quad \Gamma_{opt} = \min_{\mathbf{c} \in R^k} \max_{\Delta T \in R^m} \Gamma(\mathbf{c}, T^0 + \Delta T) < \delta,$$

где  $\delta$  – положительная действительная постоянная, характеризующая требование к точности. Управляемыми факторами в задаче (3) являются:

1) смещения  $\Delta T = \{\Delta t_i\}_m$  в пространстве моментов переключения в окрестности начального приближения  $T^0 = \{t_i^0\}_m$ ;

2) смещения  $\Delta \mathbf{c} = \{\Delta c_j\}_k$  в пространстве параметров в окрестности начального приближения  $\mathbf{c}^0 = \{c_i^0\}_k$ . Вектор  $\mathbf{c}^0$  получают в результате синтеза регулятора с помощью линейной М1 по критерию минимума ГТ.

Задача (3) решается на основе совместного использования данных испытаний, численных методов параметрической оптимизации, метода планирования эксперимента. Строится регрессионная модель, которая связывает ГТ и параметры регулятора в окрестности вектора  $\mathbf{c}^0$ . Последний определяется с помощью линейной М1. Регрессионная модель позволяет найти решение оптимизационной задачи (3). Использование стохастических тест-сигналов позволяет проверить и уточнить найденное решение.

## 4. Заключение

Для систем, для которых важна оценка диапазона мгновенной ошибки, а не только её усреднённое значение, предложены пути повышения эффективности экспериментальной отработки. Разработаны полунатурный стенд и рациональная методика испытаний оптико-электронных СТУ, которые функционируют в условиях произвольного характера входного сигнала, динамической помеховой обстановки и шумов аппаратуры. Предложена методика отработки СТУ на заданном классе входных сигналов с контролем диапазона ошибки при меньшем потребном объеме испытаний. Методика может быть использована при отработке высокоточных систем разных классов.

## Список литературы

1. 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.
2. Макаров Н.Н., Макарова Н.Н. Синтез регулятора методом гарантированной точности // Известия ТулГУ, 2000. Т. 2, Вып. 3. Управление. С. 41-51.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / Учебное издание. 4-е изд., перераб. и доп. СПб: Профессия, 2004. 752 с.