

## Методика экспериментальной отработки высокоточной системы на заданном классе входных сигналов

О. В. Горячев, email: olegvgor@rambler.ru<sup>1</sup>

В. В. Воробьев, email: vasvikt@inbox.ru<sup>1</sup>

А. К. Ломакин, email: hostel209@yandex.ru<sup>1</sup>

И. А. Меркулов, email: hostel209@yandex.ru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

**Аннотация.** В данной работе предлагается подход, основанный на использовании метода предельных отклонений в задачах моделирования, синтеза и динамических испытаний следящих систем, функционирующих в условиях произвольного характера входных сигналов из заданного класса. Дан пример синтеза и экспериментальной отработки высокоточного привода наведения.

**Ключевые слова:** следящая система, моделирование, синтез, класс сигналов, точность, динамические испытания, стенд.

Возрастающие требования к высокоточным системам (ВТС) обуславливают необходимость развития методов экспериментальной отработки систем как в виртуальном (например, реализованном в пакете Simulink системы Matlab), так и в полунатурном стендах. Развитие методологии динамических испытаний является актуальной задачей для ВТС, которые функционируют в условиях произвольного характера входных сигналов из заданного класса. Для таких ВТС важна надежная оценка диапазона мгновенной ошибки, а не только её усреднённое значение.

Предлагается использование метода предельных отклонений в качестве методологической основы решения последовательности задач, рассматриваемых на заданном классе входных сигналов [1-3]. К ним относятся задачи моделирования, синтеза, динамических испытаний.

В качестве объекта исследования в работе рассматривается электрический следящий привод (ЭСП) с двигателем серии ДБМ (бесконтактным моментным) [4, 5]. Такие приводы широко используются в современных ВТС.

Для ЭСП, допускающих линеаризацию математического описания (МО) в режиме слежения, предлагается методика проектирования с контролем диапазона динамической ошибки на заданном классе входных сигналов. Методика развивает традиционный подход к проектированию следящих приводов и содержит следующие этапы.

1. Описание класса входных сигналов.

2. Выбор исполнительного двигателя.
3. Построение МО привода и его линеаризация по медленно изменяющемуся входному полезному сигналу.
4. Синтез регулятора.
5. Проектирование физической (полунатурной) модели и стенда.
6. Формирование программы динамических испытаний.
7. Экспериментальная обработка привода на основе совместного использования компьютерной модели и лабораторного стенда.

Укажем отличительные особенности этапов методики, связанные с учетом класса входных сигналов.

Рассмотрим этап описания класса входных сигналов.

Наиболее адекватный и гибкий учёт класса входных сигналов  $V$  при синтезе линейной стационарной динамической системы обеспечивает метод гарантированной точности [1-3]. Критерий гарантированной точности (ГТ) имеет ясный содержательный смысл – наибольшая динамическая ошибка, которая может возникнуть при обработке системой сигналов произвольной формы из класса  $V$  на отрезке времени  $[0, T]$  при нулевых начальных условиях.

Для описания класса  $V$  используется вспомогательная линейная система, называемая задающим устройством (ЗУ). При этом на вход ЗУ  $u_{ЗУ}^t$  накладывается единственное ограничение по модулю,  $|u_{ЗУ}^t| \leq 1$ . Разработаны эффективные способы построения ЗУ с использованием типовых линейных звеньев, причем как в детерминированной постановке (на классе регулярных сигналов  $V$  с заданными предельными характеристиками), так и в стохастической постановке – на множестве реализаций случайного сигнала  $V$  с заданной спектральной плотностью мощности [2].

При синтезе ЭСП как астатической системы, которая инвариантна к уровню входа, формирование ЗУ производится по заданным предельным значениям скорости  $\omega_{\max} = \dot{v}_{\max}$  и ускорения  $\varepsilon_{\max} = \ddot{v}_{\max}$ , а также по области достижимости  $D$  на фазовой плоскости «скорость-ускорение» входного сигнала (рис. 1).

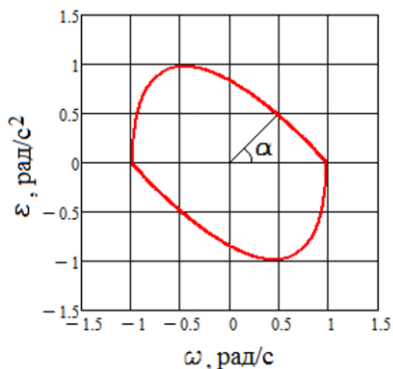


Рис. 1. Вид области достижимости ЗУ

Рассмотрим этап синтеза.

Синтез оптимального закона управления производится на заданном классе входных сигналов  $V$  по критерию минимума ГТ слежения. Критерий ГТ вычисляется с использованием расширенной системы, содержащей последовательное соединение ЗУ и линейной модели привода в режиме слежения (рис. 2). Значение функционала ГТ зависит от класса  $V$  и длительности наблюдения  $T$ , а также от вектора корректируемых параметров регулятора  $c = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ . Задача синтеза представляется как задача конечномерной оптимизации, что позволяет получать ЭСП с наименьшей в рамках заданной структуры предельной на классе сигналов  $V$  ошибкой слежения. Параметры регулятора оптимизируются из условия минимума критерия ГТ

$$\Gamma(T, V, c) = \min_{c \in R^k} \rightarrow c^0 \quad (1)$$

где  $c^0 = c_i^0$  – оптимальный вектор параметров.

С учетом требований задания к устойчивости и качеству переходного процесса задача (1) решается как задача условной оптимизации в условиях функциональных ограничений типа неравенств. Схема алгоритма оптимизации параметров фильтра на основе вычисления критерия ГТ представлена на рис. 2.

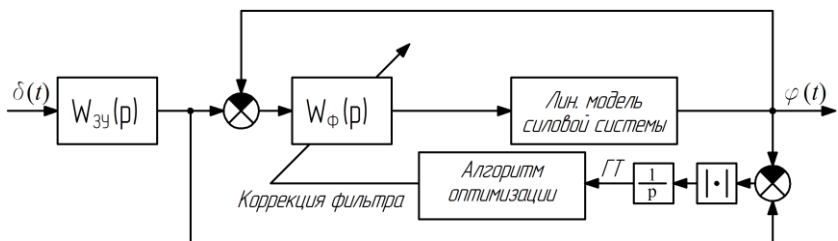


Рис. 2. Схема алгоритма оптимизации фильтра

Отметим, что воздействие дельта-функции  $\delta(t)$ , необходимое на каждом шаге алгоритма оптимизации для получения весовой функции и расчета критерия ГТ, воспроизводится заданием начального условия на интеграторе ЗУ.

Рассмотрим этап формирования программы динамических испытаний ЭСП с учетом заданного класса входных сигналов.

В расширенной программе динамических испытаний следящей системы помимо типовых тестирующих сигналов (например, гармонического, линейно-нарастающего, равноускоренного и т.д.) предполагается использование специального тестирующего сигнала вида (2), предназначенного для повышения надежности оценки предельной на заданном классе входных сигналов динамической ошибки [3]. Такой сигнал для линейной стационарной системы имеет релейную форму

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

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

Сигнал (2) подается в стенде на вход ЗУ и обеспечивает разгон ЭСП в режиме слежения до предельной ошибки на заданном классе входных сигналов. Источником данного сигнала в автоматизированном полунатурном стенде может служить, например, ПК стенда.

Рассмотрим реализацию предлагаемой методики на примере проектирования ЭСП наведения, который работает на заданные инерционную и силовую нагрузки в условиях произвольного характера входных сигналов из заданного класса.

ЭСП содержит последовательный интегро-дифференцирующий фильтр с коэффициентом передачи  $k_{\Phi}$  и постоянными времени  $T_1, T_2$  и

датчик угла поворота нагрузки с коэффициентом передачи  $k_{oc}$ . Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) управления обеспечивает в режиме слежения вибрационное сглаживание нелинейностей, что позволяет линеаризовать привод по полезному сигналу.

В качестве детерминированного входного сигнала ЭСП наведения рассмотрен маневр самолета типа «пике с горкой». На основе моделирования динамики цели построена область достижимости  $D$  в координатах скорость  $\omega$  - ускорение  $\varepsilon$  (рис. 1). Предельные значения скорости и ускорения:  $\omega_{\max} = 1 \text{ рад} / \text{с}$ ;  $\varepsilon_{\max} = 1 \text{ рад} / \text{с}^2$ . В качестве ЗУ выбрано звено третьего порядка, представляющее собой последовательное соединение колебательного звена и интегратора. Рассчитаны параметры ЗУ (коэффициент передачи, постоянная времени и коэффициент затухания):  $K = 0.186 \text{ рад}$ ;  $T = 0.997 \text{ с}$ ;  $\xi = 0.119$ .

На основе расчета потребных энергетических характеристик в качестве исполнительного выбран двигатель ДБМ-100-0.4-1.5-2.

С использованием линеаризованного МО силовой системы привода на заданном классе входных сигналов  $V$  выполнен синтез параметров фильтра по критерию минимума ГТ слежения. Достигнутое значение ГТ составило 1 мрад при показателях быстродействия и колебательности, удовлетворяющих заданию.

Сформулирована задача проектирования ФМ для лабораторно-стендовых испытаний силового ЭСП. С использованием известного МО ЭСП выполнен анализ подобия [4]. Путем нормализации МО получены критерии подобия и масштабы моделирования по фазовым переменным и времени. Сформирована система требований к ФМ и выполнен синтез корректируемых параметров ФМ.

Предполагается, что ФМ в стенде работает на уменьшенную в  $n$  - раз относительно привода-оригинала инерционную и силовую нагрузки. Использование ФМ часто упрощает конструкцию стенда и расширяет возможности проведения динамических испытаний. Потребность в физическом моделировании возникает, в частности, при экспериментальной отработке в лабораторных условиях силовых приводов наведения и стабилизации большой мощности.

Пример. Пусть возможны два варианта ФМ ЭСП, связанные с выбором прототипа модели. В данном случае прототипом ФМ может являться:

1. двигатель ДБМ-100-0.4-1.5-2;
2. двигатель той же серии, но меньшей мощности, например, ДБМ-50-0.04-6-2.

Параметры двигателей приведены на интернет-сайте производителя (завод «Машиноаппарат», г. Москва). Учитывая то, что мощные ДБМ имеют значительную стоимость (десятки тыс. р.), последний вариант является предпочтительным. Заметим, что ДБМ малой мощности, как правило, имеют стоимость в разы меньшую, чем оригинал.

Выберем в качестве прототипа ФМ второй вариант и сформируем задание на проектирование ФМ. Задача проектирования ФМ рассматривается как задача создания новой технической системы, удовлетворяющей системе требований:

1. подобия функционирования в виде равенства критериев подобия в оригинале и модели, либо в виде равенства индикаторов подобия единице

$$\frac{m_C \cdot m_e \cdot m_L}{m_J \cdot m_R^2} = 1; \quad \frac{m_z \cdot m_U \cdot m_L}{m_C \cdot m_R} = 1;$$

$$\frac{m_{T_1} \cdot m_L}{m_R} = 1; \quad \frac{m_{T_2} \cdot m_L}{m_R} = 1;$$

$$\frac{m_{K_\Phi} \cdot m_{U_{\text{вх}}}}{m_U} = 1; \quad \frac{m_{K_\Phi} \cdot m_{K_{OC}} \cdot m_\phi}{m_U} = 1,$$

где  $m_\alpha$  – масштаб воспроизведения в ФМ некоторой величины  $\alpha$  оригинала, причем  $m_\alpha = \frac{\alpha_M}{\alpha_{op}}$ . Здесь индексами “ор” обозначается оригинал, “м” – модель.

2. тождественности функционирования оригинала и ФМ по входному сигналу и сигналу ошибки;

3. специфики реализации ФМ, которая обусловлена отличием ее параметров от параметров оригинала, в частности, ДБМ-50 имеет меньшее по сравнению с оригиналом число пар полюсов  $Z$ :  $m_Z = 0.5$ .

Параметры ФМ, которые допускают коррекцию, следующие: напряжение питания  $U$ , коэффициент противо-ЭДС  $C_e$ , коэффициент передачи фильтра  $k_\Phi$ , коэффициент обратной связи  $k_{OC}$ , постоянные времени фильтра  $T_1, T_2$ , момент инерции нагрузки  $J$ , момент нагрузки  $M$ . Множество корректируемых параметров ФМ имеет вид

$$U, C_e, k_\phi, k_{OC}, T_1, T_2, J, M$$

Рассчитаны масштабы по корректируемым параметрам ФМ:

$$m_U = 1.5; m_{C_e} = 0.4179; m_J = m_M = 0.3042;$$

$$m_{T_1} = m_{T_2} = m_t; m_{K_\Phi} = m_U; m_{K_{OC}} = m_\phi^{-1}.$$

При этом масштабы воспроизведения в ФМ переменных (времени, ошибки, тока, скорости, угла) следующие:

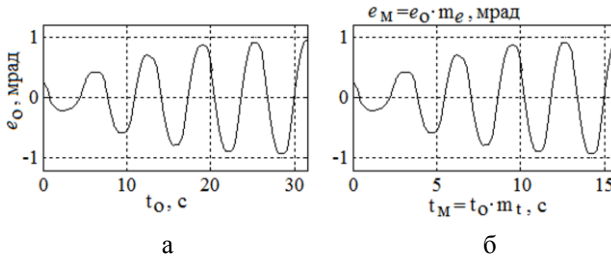
$$m_t = 0.5571; m_e = 1; m_i = 0.7222;$$

$$m_\varepsilon = 6.4431; m_\omega = 3.5837; m_\phi = 2.$$

Разработанный вариант ФМ обеспечивает строгое подобие функционирования, т.к. выполняются равенства единице всех индикаторов подобия. В ФМ имеет место масштабирование уровней тока, скорости, угла в ускоренном масштабе времени (в 1.8 раза). При этом обеспечивается тождественность по уровням входного сигнала и сигнала ошибки.

Заметим, что ускоренный масштаб времени в ФМ обусловлен меньшим в модели по сравнению с оригиналом числом пар полюсов. Практически полезным является то, что ускоренный масштаб при стендовых испытаниях сокращает время статистических испытаний и экономит ресурсы привода и стенда.

Компьютерное моделирование функционирования ЭСП и его ФМ подтвердило достоверность полученных теоретических результатов. Осциллограммы точностных испытаний ЭСП и его ФМ в режиме разгона до предельной динамической ошибки представлены на рис. 3.



*а – оригинал; б – физическая модель*

*Рис. 3. Осциллограммы сигнала ошибки в оригинале и модели*

В случае необходимости проводить испытания в реальном масштабе времени следует в качестве прототипа ФМ использовать

двигатель с тем же количеством пар полюсов, что и оригинал, например, использовать непосредственно двигатель-оригинал.

Пусть за прототип ФМ взят ДБМ-оригинал, который работает в стенде на уменьшенные в  $n$ -раз инерционную и силовую нагрузки. В данном случае вариант коррекции ФМ предусматривает  $n$ -кратное уменьшение в модели таких параметров как: коэффициент противо-ЭДС, напряжение питания, коэффициент передачи фильтра и момент инерции и момент нагрузки.

Данный вариант обеспечивает строгое подобие оригинала и ФМ, а также тождественность модели оригиналу по времени, скорости, углу, входному сигналу и ошибке. При этом в ФМ имеет место  $n$ -кратное уменьшение уровней тока, вращающего и нагружающего моментов.

Разработан автоматизированный лабораторный стенд для динамических испытаний ВТС наведения и стабилизации. Конструкция силовой системы стенда иллюстрируется на рис. 4. Стенд позволяет экспериментально обрабатывать как натурные силовые ЭСП, так и их ФМ, которые работают на уменьшенные по сравнению с оригиналом инерционную и силовую нагрузки (в том числе в ускоренном масштабе времени).

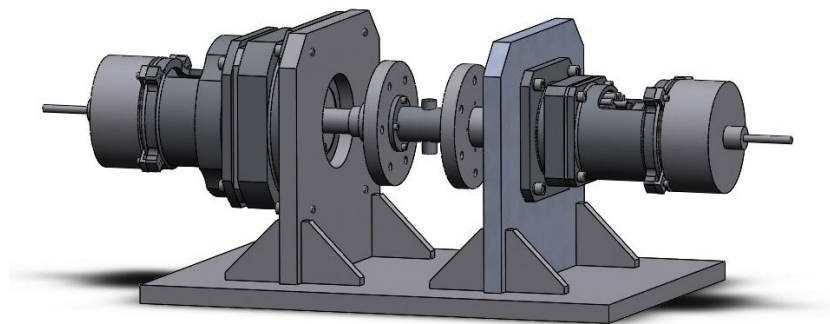


Рис. 4. Общий вид силовой системы стенда

Стенд состоит из двух моментных двигателей ДБМ70-0,16-3-2 и ДБМ 120-1,6-0,5-3, расположенных соосно и связанных механически. Каждый из двигателей имеет возможность функционировать в двух режимах: в режиме исполнительного двигателя и в режиме нагрузочного. Переключение между режимами производится



программно. Стенд позволяет задавать кинематические параметры нагрузки с помощью настроек:

- момента инерции нагрузки – осуществляется путём изменения массогабаритных характеристик навешиваемой нагрузки;
- нежёсткости механической передачи – осуществляется путём подбора толщины пластины, соединяющий валы двигателей.

### **Выводы**

Рассмотрен подход к разработке ВТС наведения и стабилизации, которые функционируют в условиях произвольного характера входных сигналов из заданного класса. Предложена методика решения последовательности задач моделирования, оптимального синтеза, динамических испытаний систем. Методика позволяет повысить надежность экспериментальной оценки точности как в виртуальном, так и в полунатурном стендах, что в целом повышает эффективность разработки ВТС, для которых важна оценка диапазона мгновенной ошибки, а не только её усреднённое значение.

Разработан автоматизированный полунатурный стенд для экспериментальной отработки высокоточных силовых следящих приводов наведения и стабилизации. Показано, что использование физических моделей позволяет расширить возможности лабораторно-стендовых испытаний ВТС и снизить затраты времени и средств на их проведение.

### **Список литературы**

1. Воробьев В.В. Метод гарантированной точности для релейных следящих систем / В.В. Воробьев, Н.Н. Макаров, А.А. Парамонова // Мехатроника, автоматизация, управление, № 10 (127). – М., Новые технологии, 2011. – С. 32 – 38.
2. Макаров Н.Н., Макарова Н.Н. Синтез регулятора методом гарантированной точности // Известия Тульского государственного университета, т. 2, вып. 3. Управление. 2000. – С. 41–51.
3. О.В. Горячев, В.В. Воробьев, А.К. Ломакин, И.А. Меркулов. Разработка методики полунатурных испытаний высокоточной системы телеуправления / Информатика: проблемы, методы, технологии. Материалы XX Международной научно-методической конференции, Воронеж, 13-14 февраля 2020 г. С. 391-400.
4. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе / И.Е. Овчинников. – СПб. : БХВ-КОРОНА-Век, 2012. – 336 с.

5. Чемоданов Б.К. Следящие приводы / Б.К. Чемоданов [и др.] – 2-е изд., доп. и перераб. Т.2: Электрические следящие приводы. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 880 с.