

Системы автоматического управления высшей точности

В.А. Жмудь, НГТУ, Новосибирск

Аннотация: Системы автоматического управления (САУ) действуют по принципу отрицательной обратной связи. Обратная связь осуществляется путем измерения выходного сигнала (состояния) управляемого объекта, сравнением его с предписанным (требуемым) значением этого состояния, и использованием этой разницы, называемой ошибкой для формирования управляющего воздействия на объект. Таким образом, выход объекта влияет на вход объекта, что и порождает петлю управления или замкнутый контур управления. Отличие САУ высшей точности (САУ ВТ) состоит в том, что при их проектировании особое внимание уделяется проблемам достижения высокой точности управления. В данной работе даны основные понятия, проблематика и методы проектирования САУ ВТ.

Ключевые слова: Автоматика, управления, погрешность, ошибка, точность, стабилизация

ВВЕДЕНИЕ

Высшая точность САУ означает достижение погрешности намного меньше, чем 1 %, то есть на порядок и выше [1–4]. Это означает, что допустимая погрешность таких САУ не может превышать 0,1 %, а иногда и это – очень много.

При изучении курса САУ студенты привыкают судить о качестве системы по графику переходного процесса. В целом этот подход правилен. Но на полном графике переходного процесса (от начала до конца) погрешность в один процент не видна. Действительно, если, например, даже если использовать экран размерами в тысячу точек в высоту, то 0,1 % – это один пиксель, меньше, чем ширина линии. Не только методы проектирования, но даже и методы визуальной оценки результата по графикам переходных процессов для таких САУ следует пересмотреть.

1. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ

Все САУ используют принцип управления объектом по ошибке, то есть по отклонению выходной величины объекта от предписанного значения. Поскольку объект управляется по величине ошибки, может возникнуть ошибочное

ощущение, что если ошибки нет, то и управления нет. То есть достижение нулевого значения ошибки якобы делает систему неуправляемой. В этом нет никакого парадокса, поскольку если ошибка действительно равна нулю, то объект в этом состоянии не должен подвергаться воздействию, которое стремится изменить состояние объекта. Если же ошибка не равна нулю, то на объект следует воздействовать для изменения его состояния.

На самом деле все обстоит не столь однозначно и просто. Текущее состояние, измеряемое только значением выходного сигнала, еще гарантирует того, что объект в данный момент управляется успешно, поскольку может оказаться, что, несмотря на то, что выходное значение и равно предписанному, в этот момент скорость и направление изменения этого состояния далеки от желаемых. В этом случае объект в ближайшее время настолько быстро отклонится от этого предписанного значения, что вернуть его будет достаточно трудно или даже невозможно. Поэтому успешность управления состоит не только в достижении выходным состоянием требуемого значения, но и длительное удержание объекта в требуемом состоянии, а если требуемое состояние изменяется, то фактическое состояние должно изменяться точно так же. Поэтому даже если выходное состояние объекта совпадает с предписанным значением, это не означает, что на объект не следует воздействовать. Воздействие на объект зависит не только от ошибки управления, но и от ее производной по времени, а также от ее интеграла по времени. Регулятор осуществляет дифференцирование и интегрирование ошибки, выходной сигнал регулятора чаще всего представляет собой сумму трех компонент: пропорциональной, интегральной и дифференциальной. Такой регулятор носит название ПИД-регулятора.

Ошибку управления можно разделить на статическую и динамическую. Статическая ошибка – это наиболее низкочастотная (статическая) компонента отклонения значения выходного сигнала объекта от предписанного значения. Динамической ошибкой называют высокочастотную компоненту этого отклонения, то есть все виды отклонения, за исключением статической ошибки.

При этом в теории автоматического управления (ТАУ) считают, что датчик выходной величины объекта ошибки не имеет. Это происходит не от того, что специалисты по ТАУ верят в идеальность такого датчика, а потому, что учет ошибки датчика не возможен методами ТАУ. Ошибка датчика не может быть устранена регулятором, она внесет свой обязательный вклад в погрешность управления объектом. Поэтому, коль скоро устранение влияния ошибки невозможно, в ТАУ не имеет смысла обсуждать эту ошибку, достаточно предположить, что разработчики датчиков использовали все свои знания и умения для уменьшения этой ошибки.

Однако, разработчик системы не столь уж беспомощен. Во-первых, он может осуществить выбор типа датчика и осуществить учет его влияния. Во-вторых, используя, например, несколько датчиков одновременно, можно повысить точность системы в целом. В-третьих, в большинстве ситуаций разработчик регулятора и разработчик остальных электронных элементов системы – это одно и то же лицо, поэтому имеется возможность влияния на все электронные элементы системы, на их выбор, на схему их включения и так далее.

Кроме датчиков на точность работы системы оказывают влияние и приводы, то есть устройства, которые осуществляют формирование воздействия на объект. Регулятор лишь формирует электрический сигнал, а вид воздействия на объект может быть иным, не электрическим. Это может быть нагрев, механическое перемещение и так далее. Даже если воздействие на объект осуществляется электрическим путем, может оказаться, что воздействующий сигнал должен быть высоковольтным или сильноточным. В этом случае требуется усилитель напряжения или тока, или мощности (и напряжения, и тока). При проектировании регуляторов методами ТАУ на приводы обращают мало внимания, зачастую привод относят в неизменяемой части системы, то есть к объекту регулирования. Качество приводом может оказать существенное влияние на динамическую ошибку, а в некоторых случаях даже на статическую погрешность.

Весьма важный класс систем – системы настройки на экстремум, называемые в ТАУ также «экстремальные системы управления». В рамках курса ТАУ считается достаточным, чтобы ошибка в системе с течением времени стремилась к нулю, что обеспечивается устойчивостью системы. Иногда обращают внимание на качество переходного процесса, что требует отсутствие или малую величину перерегулирования, отсутствие или малую амплитуду и быстрое затухание колебаний, относительно малую длительность процесса и относительно малую остаточную (статическую) ошибку. В системах управления высшей точности зачастую требования столь серьезны,

что в обычном курсе ТАУ они даже в первом приближении не рассматриваются.

Пример 1. Требования к системе стабилизации частоты лазера.

Гелий-неоновый лазер формирует монохроматическое оптическое излучение в инфракрасной области частот F (длина волны приблизительно равна $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$) с девиацией этого значения на уровне $\Delta F = 10 \text{ МГц}$. За счет обратной связи требуется стабилизировать частоту излучения с погрешностью менее $\delta F = 0,1 \text{ Гц}$. Исходная девиация в сто миллионов раз превышает допустимую остаточную девиацию. Известно, что статическая ошибка в системе за счет действия обратной связи уменьшается, кратность уменьшения равна статическому коэффициенту усиления контура. Соответственно, коэффициент усиления в этой системе должен быть не меньше $K_{\text{мин}} = \Delta F / \delta F = 10^8$.

Пример 2. Пусть требуется подавление шумовой девиации частоты (см. Пример 1) равное $\Delta F_1 = 1 \text{ МГц}$, происходящее в области звуковых частот (расчетное значение, например, $f = 10 \text{ КГц}$) до величины не более $\delta F = 0,1 \text{ Гц}$. Необходимо на этой основе сформулировать требования к логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) системы. На основе этих данных следует сделать вывод, что ЛАЧХ системы в области от нулевых частот до частоты f должна располагаться выше $K_f = \Delta F / \delta F = 10^7$. На Рис. 1 показаны варианты соответствующей ЛАЧХ.

Согласно требованиям по Примеру 2, левая часть ЛАЧХ должна быть выше точки, положение которой задано частотой f и усилением K_f . В Примере 1 задается только минимальное значение самой крайней точки этой характеристики, которая находится слева в бесконечном удалении. Требование Примера 1 – это требование только к статической ошибке, которое относится к нулевой частоте. Требование Примера 2 – это требование к ошибке в полосе от нулевой частоты до частоты f .

Пример 3. Могут быть причины для того, чтобы выдвигать и такие требования, которые ограничивают ЛАЧХ сверху в некоторой области частот. Например, в сигнале, поступающем с датчика выходной величины объекта, может присутствовать помеха, существенно превышающая информативную часть сигнала в некоторой области частот. В этом случае необходимо, чтобы коэффициент усиления контура в области этих частот был много меньше единицы. Например, штриховая линия на Рис. 1 не удовлетворяет таким требованиям, а сплошная линия этим требованиям удовлетворяет.

Таким образом, зависимость требований к регулятору от требований к системе может быть весьма непростой. Мы увидели, что достаточно важными могут оказаться требования к ЛАЧХ условно **разомкнутого контура**. Наряду с этим

обязательно имеются определенные требования к амплитудно-фазовой характеристике этого контура (ЛФЧХ).

Эти две характеристики всегда принимаются во внимание при расчете регулятора и являются основой такого расчета. Наряду с ними следует принимать в расчет и особенности датчиков,

такие как их статическая ошибка (смещение), их динамическая ошибка, шумы, дрейф смещения (дрейф во времени и тепловой дрейф) и так далее.

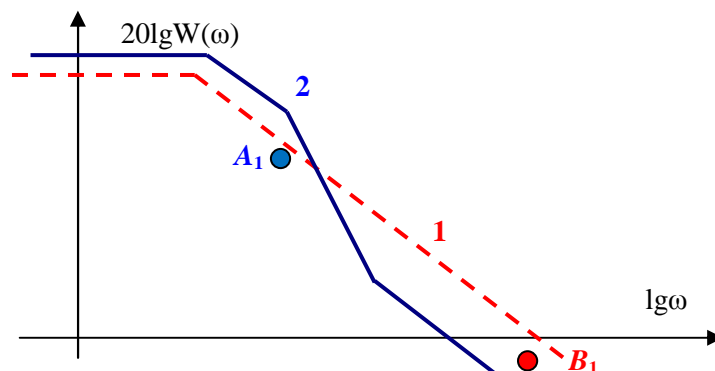


Рис. 1. Варианты ЛАЧХ, охватывающей критическую точку A_1 (линия 2 при этом не охватывает точку B_1): по оси абсцисс – логарифм частоты, по оси ординат – логарифм усиления

Для линейных систем наиболее эффективен аппарат частотных комплексных характеристик или связанный с ними аппарат преобразований Лапласа. Аргументом преобразования Лапласа является комплексный параметр s , а для частотных характеристик применяется его мнимая часть, т. е. частота. Типичная

структурная схема замкнутой системы управления показана на Рис. 2, где в прямоугольниках записаны частотные характеристики отдельных звеньев, а также применены типовые обозначения сигналов в системе [1–4].

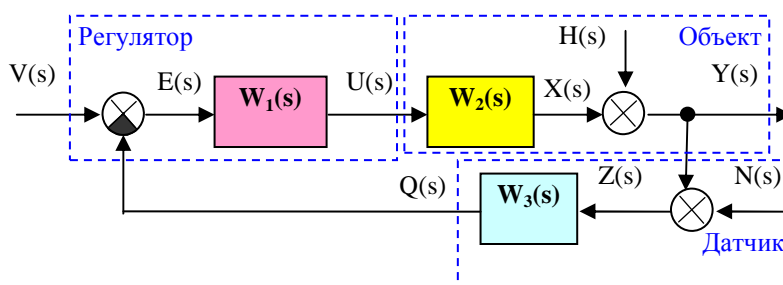


Рис. 2. Расчетная структурная схема САУ ВТ

А именно: $y(t)$ – выходная величина объекта; $v(t)$ – предписанное значение выходной величины (задание); $u(t)$ – управляющий сигнал, подаваемый регулятором на объект; $h(t)$ – возмущение, действующее на объект, приведенное к единицам выходной величины; $x(t)$ – состояние объекта, т.е. такое значение его выходной величины, которое было бы при отсутствии возмущения; $e(t)$ – ошибка управления; $n(t)$ – шум измерения выходной величины; $z(t)$ – результат измерения выходной величины; $q(t)$ – выходной сигнал датчика величины $y(t)$. Кроме того, применяется традиционная замена строчных букв на прописные при замене функций времени на их операторное преобразование, например, $V(s)$ – преобразование от сигнала $v(t)$. Преобразование Лапласа от константы есть $1/s$. Поскольку, как правило, сами операторные значения входных, выходных и промежуточных сигналов не

используются для вычислений, а используются лишь их отношения, т. е. передаточные функции, то сложилась практика использования модифицированного преобразования, а именно Лапласа–Карсона, которое получается умножением на s , вследствие чего образ константы есть также константа. На значения передаточных функций это не влияет, поэтому мы будем использовать терминологию преобразований Лапласа.

Структурная схема Рис. 2 – графическое отображение взаимосвязей сигналов, которое может быть заменено следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} E(s) &= V(s) - Q(s); & U(s) &= W_1(s)E(s); \\ X(s) &= W_2(s)U(s); & Y(s) &= X(s) + H(s); \\ Z(s) &= Y(s) + N(s); & Q(s) &= W_3(s)Z(s). \end{aligned}$$

При решении этой системы относительно любой из величин внутри контура (например, зависимость Y от V , N и H) в результате неизбежно появляется рациональная дробь, причем, знаменатель этой дроби всегда один и тот же, и он равен

$$W_{OC} = 1 + W_1(s)W_2(s)W_3(s). \quad (1)$$

Например, выходная величина определяется соотношением:

$$Y(s) = W_V(s)V(s) + W_H(s)H(s) + W_N(s)N(s). \quad (2)$$

При этом

$$W_V(s) = [W_{OC}(s) - 1] / W_{OC}(s), \quad (3)$$

$$W_H(s) = -1 / W_{OC}(s), \quad (4)$$

$$W_N(s) = -[W_{OC}(s) - 1] / W_{OC}(s). \quad (5)$$

Если (1) стремится к бесконечности, то соотношение (3) стремится к единице, а соотношение (4) стремится к нулю. Это означает, что выходная величина ставится равной входной величине. Это можно найти в любом учебнике по теории автоматического управления. Но следует обратить внимание также и на соотношение (5), которое в этих же условиях стремится к минус единице. Это означает, что погрешность датчика со знаком минус добавляется к выходной величине, то есть порождает ошибку, которую система автоматического управления никак не подавляет. **Ошибка измерения дает ошибку управления.**

Если же (1) обращается в ноль, то все передаточные функции (3), (4) и (5) обращаются в бесконечную величину. Это означает, что любые сколь угодно малые входные сигналы (шум, задание, или возмущение) вызывают «сколь угодно большие» выходные сигналы, а с учетом поправки на физическую реализуемость это означает, что система вместо того, чтобы находиться в равновесном состоянии, движется к максимально возможному отклонению от него или совершает колебательные движения с максимально достижимой амплитудой.

Для предотвращения этой ситуации как раз и требуется регулятор, расчету которого посвящена вся теория автоматического управления.

Для исследования устойчивости системы необходимо исследовать взаимосвязь динамических моделей элементов, входящих в систему. Действительно, если две различные системы описываются идентичными математическими моделями, то и их выходные сигналы должны быть одинаковыми при совпадении входных сигналов.

Эффективный способ исследования замкнутых систем – моделирование этих систем. Например, программное обеспечение *VisSim* позволяет реализовать математические модели подавляющего большинства известных динамических звеньев, а также осуществить

соответствующие связи сигналов с выходов на входы и сформировать необходимые входные сигналы. Поэтому запуск имитационного моделирования обеспечивает получение графиков переходных процессов, идентичных реальным сигналам в реальной системе при условии полного соответствия всех математических моделей своим прототипам – элементам реальной системы.

Наиболее часто встречаются в качестве элементов модели линейные динамические звенья, описываемые рациональными передаточными функциями от s .

2. ВЛИЯНИЕ ДАТЧИКОВ

Измерительные устройства или датчики оказывают решающее влияние на точность системы. Поэтому выбору датчиков следует уделять особое внимание.

Пример 4. Пусть требуется стабилизация температуры устройства за счет системы, использующей измеритель температуры на основе термометра сопротивления. Предположим, температура окружающей среды может изменяться от 20° до 30° . Предписанная температура равна 10° , допустимая погрешность не должна превышать $0,02^\circ$. Необходимо сформулировать требования к системе.

1. Решение задачи на основе только теории автоматического управления.

Разница между требуемой температурой и той температурой, которая установится вследствие температуры окружающей среды составляет от 10 до 20° . Следует ориентироваться на худший случай. Следовательно, берем 20° . Статический коэффициент усиления должен быть не менее отношения этой величины к допустимой ошибке, что дает $20 / 0,02 = 1000$ (то есть 60 дБ).

2. Учет области частот

Ожидания действия системы не быть «вечным», поэтому следует задать быстродействие системы. Даже если заказчик не указал области, следует из общих соображений задать этот параметр. Например, среднесуточная температура изменяется с известной скоростью. Если в помещении, где находится устройство, имеется дверь или окно, можно ожидать изменения температуры окружающей среды вследствие того, что окно или двери открываются, или закрываются. Приблизительно за 10 минут температура окружающей среды может измениться от максимального значения до минимального или наоборот. Исходя из этого, следует потребовать, как минимум, чтобы на частоте, соответствующей периоду 10 минут, коэффициент усиления был не менее, чем коэффициент, определенный в первом пункте. Это дает требование того, чтобы ЛАЧХ от минус бесконечности до $f_1 = 1/600$ Гц была выше значения 1000 , т.е. выше 60 дБ.

3. Учет нагрева всего устройства

Поскольку в системе будут протекать некоторые токи, в ней будет выделяться некоторое тепло. Если объект будет установлен на термоэлектрической батарее, то для его охлаждения потребуется протекание и через эту батарею. В термоэлектрической батарее одновременно действуют два эффекта, один – охлаждение или нагревание вследствие эффекта Пельтье, другой – нагревание вследствие выделения мощности на сопротивлении, через которое протекает ток. В зависимости от площади используемого радиатора второй эффект может оказывать более или менее существенное влияние. Можно утверждать, что не будет большой ошибки, если исходить из того, что при отключении системы обратной связи (но при работе всех электронных устройств) температура объекта может оказаться равной 60° или около того. Следовательно, возмущение следует оценить уже не как 20° , а как 50° . Тогда критическое значение коэффициента усиления должно быть равным не 1000, а 2500 (66,5 дБ).

4. Учет свойств датчика

Поскольку датчик непременно вносит ошибку в работу систему (будем называть ее погрешностью датчика), то следует, во-первых, предварительно распределить вклад в общую погрешность между двумя этими источниками, во-вторых, задать по-отдельности требования к датчику и требования к регулятору (или к замкнутому контуру системы). Разумным выбором будет потребовать нулевое значение статической ошибки, порождаемой значением статического усиления контура. Действительно, введение в регулятор интегратора делает (как правило) статический коэффициент контура бесконечным, отчего статическая ошибка становится равной нулевой. (Речь идет об ошибке за счет неидеальной работы контура, а не обо всей погрешности). Что касается динамической ошибки, то можно, например, распределить ее поровну между ошибкой за счет датчика и ошибкой за счет свойств контура. Тогда для надежности значение критического усиления поднимем еще вдвое, то есть получим значение 5000 (74 дБ). От датчика потребуем статической погрешности не более $0,02^{\circ}$ и динамической погрешности не более $0,01^{\circ}$ в интересующей нас области частот. Обсудим указанные параметры. Если, например, использовать самый распространенный термометр сопротивления (ММТ), этот элемент изменяет свое номинальное значение сопротивления приблизительно на 1 % на градус. Если же обратиться к такому параметру этого элемента, как его стабильность во времени, то выяснится, что за месяц работы этот элемент может изменить свое номинальное значение также на 1 %. Эта величина в 50 раз хуже, чем требуется. Требуемый датчик может быть изготовлен из медной проволоки, а лучше

– из платиновой, поскольку для меди указанная погрешность является наилучшей из возможных. Необходимо брать тонкую длинную проволоку, чтобы сопротивление было достаточным для измерения. Это сопротивление должно быть много большим, чем сопротивление соединительных проводов в схеме. Также в схеме обязательно возникнет эффект термопары в двух точках соединения платины с соединительными проводниками, что также может существенно ухудшить погрешность измерения. Иными словами, мы видим, что изготовление системы стабилизации температуры с указанными характеристиками является очень сложной задачей, для решения которой требуются обширные знания и опыт, учет многих факторов.

5. Фактический результат

Система стабилизации на самом деле будет стабилизировать только температуру датчика температуры. Сам объект, чью температуру следует стабилизировать, не является датчиком, он лишь находится близко к нему, его температура посредством тепловой связи влияет на температуру датчика, но не совпадает с ней, имеется градиент температуры в системе. Если объект окружен датчиками со всех сторон, и все они дают одинаковый результат измерения, то можно надеяться, что это и есть температура объекта. На практике в объекте происходят процессы, в том числе тепловые. Например, если объектом является полупроводниковый лазер, то в его активной области протекает ток накачки, где и порождается свечение. Остальная часть этого прибора более холодная, чем активная область, но именно стабилизация температуры этой активной области составляет задачу, которую необходимо решить.

3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ

Для борьбы с проблемой необходимо знать ее источник. Существуют проверенные методы их отыскания.

1. Исключительные изменения параметров (улучшение или ухудшение).

2. Синхронное детектирование (для выявления причинно-следственной связи).

3. Сравнение двух идентичных систем (с внесением тестовых изменений в одну из них или без таковых изменений).

Пример 5. Лазерная система, состоящая из электронной и оптической части, требует предварительного прогревания прежде, чем она выйдет в рабочий режим, то есть прежде, чем собственные девиации частоты войдут в зону допустимых отклонений от их «стартового» значения. Требуется локализовать причину для того, чтобы с ней бороться.

Прежде, чем обсуждать метод решения этой задачи, необходимы пояснения термина «отклонение».

Если имеется генератор некоторой частоты (по возможности наиболее точно формирующий

значение этой частоты), то точность (или качество) его работы следовало бы описывать такими показателями, как его статическая и динамическая ошибка. Предположим, фактическое значение, которое данный генератор должен формировать, равно 1 ТГц . Если на самом деле этот генератор формирует частоту, которая в среднем (при осреднении за очень большое время, например, за 100000 секунд) отклоняется от этого значения на 100 Гц в плюс, то это и будет его статическая ошибка. Можно говорить и о динамической ошибке. Например, можно дать такие характеристики, как максимальное отклонение от этого значения. Естественно, что если в среднем частота отклоняется на 100 Гц , то в отдельные моменты она может отклоняться существенно больше, например, на 300 Гц , как в плюс, так и в минус. Например, если частота на протяжении 2000 секунд будет отклоняться на 300 Гц в плюс, а потом на протяжении 1000 секунд будет отклоняться на 300 Гц в минус, то среднее отклонение как раз и будет плюс 100 Гц . Как видим, средняя погрешность – это величина, которая может оказаться намного меньше, чем максимальная погрешность. Если бы частота отклонялась поочередно в плюс и в минус на любую большую величину, но время пребывания в обоих этих состояниях было бы одинаковым, то средняя погрешность и вовсе была бы равной нулю. Поэтому малая средняя погрешность – это вовсе не такой «надежный» показатель «точности», как это кажется.

Ситуация еще хуже, чем вытекает из предыдущего рассуждения. На самом деле невозможно определить, насколько формируемая частота отклоняется от предписанного значения, поскольку других формирователей предписанного значения, более точных, чем лазерные стандарты частоты, в природе не имеется. Поэтому возникает задача о том, как узнать погрешность такого формирователя, который является лучшим из всех имеющихся. Эта задача – задача фундаментальной метрологии.

Мы не можем знать, насколько неточен лучший в мере эталон частоты. Единственный вариант его исследования – это сравнение его частоты с частой такого же (идентичного) эталона. Если включить два одинаковых эталона частоты, каждый из них будет формировать сигнал со своим индивидуальным значением частоты. Каждое из них характеризуется какой-то погрешностью. Мы не можем знать значение этой погрешности. Поэтому мы можем лишь предполагать, что погрешность каждого из таких устройств приблизительно одинакова, поскольку устройства одинаковы. Мы можем предполагать, что эти погрешности независимы друг от друга. Эта гипотеза не выдерживает никакой критики, но иного не дано.

Скажем, если частота первого эталона на 100 Гц больше частоты второго эталона, то

возможно много вариантов того, как дела обстоят в действительности.

Оптимистическая гипотеза: можно предположить, что каждый из этих эталонов отклоняется в противоположную сторону. Можно надеяться, что истинное значение частоты находится посередине, первый эталон дает погрешность в плюс на 50 Гц , второй эталон дает погрешность в минус на 50 Гц . Такое предположение, очевидно, не верно.

Пессимистическая гипотеза: можно предположить, что оба эталона отклоняются в одну и ту же сторону, тогда получается, что погрешность одного эталона на 100 Гц больше, чем погрешность другого эталона. Кажется, что если эталоны идентичны, то нет никаких оснований считать, что один из них настолько хуже другого. Поэтому может показаться, что эта гипотеза также ошибочна.

Среднеквадратическая гипотеза: согласно математическим теориям о суммировании отклонений случайных независимых величин, их дисперсии складываются, а среднеквадратическое отклонение – это корень из дисперсии. Если так, то каждый эталон дает вклад, определяемый как квадратный корень из итогового вклада, то есть надо предположить, что погрешность каждого эталона составляет приблизительно $70,7\text{ Гц}$.

Все же наиболее верной является пессимистическая гипотеза. Действительно, хотя и имеется предположение, что эталоны идентичны, нельзя отбросить вероятность того, что отклонения каждого эталона от истинного значения имеют один и тот же знак. Действительно, эти эталоны находятся, как правило, в одинаковых температурных условиях, они питаются от одной и той же электрической сети, они находятся под действием одних и тех же магнитных полей Земли, одних и тех же гравитационных сил со стороны Солнца и Луны, и многих факторов, которыми приходится пренебрегать не вследствие их малости, а вследствие невозможности их учета. Одинаковое отклонение от требуемой величины может быть много большим, чем разница между формируемыми величинами, и поэтому даже идентичные генераторы (эталон частоты) могут характеризоваться одинаковой компонентой отклонения, которая гораздо больше, чем вариативная компонента.

Фактическое отклонение стандарта частоты от его идеального значения не изучается, поскольку нет возможности его изучения. Поэтому может быть изучено отклонение частот двух идентичных стандартов друг от друга и отклонение одного стандарта частоты от его стартового значения или от значения, принятого за стартовое.

Второй вариант невозможен, так как измерение частоты стандарта частоты – это сравнение его значения с чем-то иным, так что

мы приходим к единственно возможной схеме – изучение отклонения двух стандартов частоты друг от друга с течением времени. Схема исследований такова: включаются два одинаковых стандарта частоты (лазерных стабилизированных источников света), формируется сигнал разностной частоты (свет от двух источников направляется на общий фотоприемник, на выходе которого формируется сигнал разностной частоты), эта частота непрерывно измеряется во времени, и по графику этой разностной частоты делаются выводы о «точности» этого «эталона частоты».

Итак, если осуществлять такие измерения сразу же после включения всей системы, содержащий два эталона и одно устройство сравнения и регистрации, то окажется, что сначала разница довольно быстро изменяется во времени, затем она выходит на некоторый условно стабильный уровень, и далее изменяется относительно этого уровня уже не столь существенно.

Можно эти изменения разбить на два (по частотно-временным характеристикам): а) только средняя составляющая от этой разницы (сдвиг); б) только переменная составляющая от этой разницы (девиации). Если данные собирать с самого начала включения установки, средний сдвиг будет намного больше. То есть системы сначала выходят в режим, затем работают более успешно.

Выход в режим определен как необходимость прогрева всех элементов системы. Поскольку система содержит электронную и лазерную часть, естественно предположить, что лазерная часть как раз и требует прогрева, поскольку она более массивна и в ней циркулирует больше энергии.

На самом деле оказалось, что это далеко не так: прогрева требовала именно электронная часть. Вопрос состоит в том, как это было выяснено.

Ответ дала серия из двух экспериментов. В первом случае сначала была включена только лазерная часть, после ее прогрева была включена электронная часть, после чего сразу же была осуществлена регистрация разностной частоты. Во втором случае сначала была включена только электронная часть, после ее прогрева за такой же срок была включена лазерная часть и сразу же начата регистрация показаний. Оказалось, что во втором случае выход в режим произошел намного быстрее, чем в первом, то есть виновной в основной погрешности была именно электронная часть системы. После этого подобным методом пошаговой локализации был найден блок, ответственный за погрешность (также с использованием анализа всей схемы), и после улучшения электронной схемы системы необходимость длительного прогрева отпала.

Пример 6. Один из методов поиска неисправности в сложном изделии цифровой

техники состоит в том, чтобы последовательно улучшать условия работы для отдельных ее элементов. Это намного эффективнее, чем поочередно заменять одну микросхему на другую (так как это может потребовать замены всех микросхем, пока не отыщется неисправная) – такой метод формально очень прост, но он крайне затратный. Это также лучше, чем анализ всех сигналов в устройстве, потому что такой метод не требует затрат лишних микросхем, но он требует очень глубоких знаний, затрат большого ресурса времени, высокой квалификации и кропотливой работы настройщика радиоэлектронной аппаратуры. Известно, что многие цифровые микросхемы начинают хуже работать при прогреве (это не относится к микросхемам эмиттерно-связанной логики, с ними дело обстоит наоборот). Поэтому охлаждение неисправно работающей микросхемы может способствовать восстановлению ее параметров. Исследователь использует кисточку, смоченную в жидком азоте, и поочередно смачивает жидким азотом одну микросхему за другой. Поскольку жидкий азот быстро испаряется, охлаждение происходит кратковременно. В устройстве каждая из микросхем поочередно помещается в улучшенные условия работы. Если неисправная микросхема, которая была в устройстве единственной, в результате охлаждения начнет работать исправно, то все устройство в этот момент начнет работать исправно. Это позволит выявить неисправную микросхему, заменить ее и отремонтировать все устройство. Если в устройстве неисправных микросхем несколько, этот метод трудно будет применить.

Пример 7. Некоторые события могут совпасть во времени, из чего может быть сделан ошибочный вывод об их причинно-следственной связи. Для проверки этой гипотезы следует периодически изменять один из факторов, который гипотетически рассматривается как причина. Если следствие будет повторяться с тем же периодом, синхронно, это указывает на существование такой связи. Если же случайные изменения предполагаемого следствия не будут синхронными, то следует отклонить предположение об их причинно-следственной связи.

Пример 8. В предположении, что в системе следует улучшить один из параметров, следует сравнить эту систему с работой другой идентичной системы, в которой этот параметр не изменяется. Произведя однократное улучшение параметра, и зафиксировав однократное улучшение результата сравнения, можно сделать ошибочное заключение об эффективности этого улучшения. Для достоверности следует неоднократно осуществить улучшение, а затем ухудшение этого параметра. Если изменения результата

будут синхронны, следовательно, сделанное улучшение эффективно.

Пример 9. Если, например, предполагается, что в системе недостаточный коэффициент усиления, то улучшение одной из системы может проявиться в результате не существенно, так как другая система останется нестабильной. Вместо улучшения можно с целью исследования принудительно ухудшить этот же параметр, в данном случае – уменьшить усиление в системе. Если данный параметр имел критическое значение, то его уменьшение заметно скажется на результате, что будет легко выявлено. Следовательно, данный параметр следует не только вернуть в исходное положение, но и улучшить в еще большей степени.

Пример 10. Зачастую улучшение какого-либо параметра требует дорогостоящих вложений, тогда как ухудшение этого параметра ничего не стоит. В этом случае при исследованиях достаточно ухудшать поочередно каждый из подобных параметров, определить вклад этого ухудшения, из чего легко вычислить вклад соответствующего улучшения. Если улучшение обещает достаточный эффект, целесообразно его осуществить, если же эффект не ожидается, его можно не осуществлять на данном этапе. К таким параметрам, которые сложно улучшить, может быть отнесена, например, чувствительность фотоприемника, мощность излучения лазера, стабильность тока лазера, стабильность электропитания всей системы, качество оптических покрытий, эффективность использования света, и так далее. Вместо стабилизации электропитания можно, например, изменить его с использованием автотрансформатора, что позволит оценить вклад нестабильности питания. Вместо улучшения зеркал можно ввести нейтральный фильтр, который ослабит мощность света, что по эффекту эквивалентно ухудшению зеркал, и так далее.

4. ДЕЙСТВИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ СИСТЕМЫ

Последовательность действий при улучшении системы.

1. Следует аналитически выделить возможные источники недостаточной точности системы.

2. Путем последовательных экспериментов следует определить экспериментально вклад нестабильности каждого из таких параметров в погрешность всей системы.

3. Следует рассчитать вклад каждой нестабильности каждого параметра в общую погрешность как произведение величины этой нестабильности параметра на коэффициент его вклада.

4. Следует выявить наибольший вклад в общую погрешность и предельно его уменьшить путем снижения погрешности его стабилизации.

5. УХУДШЕНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вклад каждого фактора может быть определен как отношение приращения выходной величины к приращению этого фактора. Математически это означает частную производную по параметру.

Задачей стоит улучшение стабильности выходной величины Y . Факторы, ухудшающие эту стабильность, обозначим обобщенно Q_i , куда могут входить и шумы датчиков, и нестабильности отдельных элементов, и помеха, и так далее.

Для определения отношения приращения величины Y к приращению Q_i необходимо задать соответствующее приращение только этому параметру, не задавая его никакому другому параметру. Это технически может оказаться достаточно сложно. Кроме того, улучшить какой-либо параметр не только сложно, но и дорого.

Гораздо дешевле этот параметр временно ухудшить. Мы исходим из предположения, что частная производная слева равна частной производной справа, то есть функция частной производной выходной величины по интересующему нас параметру гладкая функция.

Для исключения влияния изменений других параметров следует использовать метод синхронного детектирования. А именно: если изменения параметра на заданную величину сопровождалось ухудшением стабильности выходной величины (однократно), это еще не доказывает причинно-следственной связи между этими событиями. Если же такой эксперимент производился многократно, и всякий раз такие изменения происходили синхронно и на одинаковую величину, можно обоснованно предположить о взаимосвязи этих изменений.

Пример 11. Пусть, например, стабильность электропитания составляет $\Delta U / U = 0,05$ (то есть 5%), стабильность мощности лазера составляет $\Delta P / P = 0,01$ (то есть 1%), погрешность стабилизации температуры эталона составляет $\Delta t = 0,1^\circ\text{C}$. Искусственно ухудшим стабильность питания на величину $\Delta U_1 / U = 0,05$ (то есть доведем ее до 10%), выявим ухудшение стабильности частоты системы до величины $\Delta f_1 = 0,5 \text{ Гц}$. Отсюда коэффициент приращения равен $K_1 = \Delta f_1 / \Delta U_1$. Вклад исходной нестабильности равен $\Delta F_1 = K_1 \Delta U = 0,5 \text{ Гц}$. Далее изменим температуру эталона на 1°C , зафиксируем вклад этого явления в изменения частоты на величину 2 Гц , что дает вклад фактической погрешности стабилизации равный $\Delta F_2 = K_2 \Delta t = 0,2 \text{ Гц}$.

Аналогично определим вклад нестабильности мощности лазера на уровне $\Delta F_3 = K_3 \Delta P = 0,1 \text{ Гц}$. Тогда расчетная погрешность равна квадратному корню из суммы квадратов этих величин, то есть

$$\Delta F = (0,25+0,04+0,01)^{1/2} = 0,548.$$

Если стабильность электропитания улучшить, например, в два раза, то получим

$$\Delta F = (0,0625+0,04+0,01)^{1/2} = 0,335.$$

Эффект почти 39 %. То есть такое улучшение эффективно. Если, например, вместо этого улучшить вдвое стабильность второго параметра, то получим

$$\Delta F = (0,25+0,01+0,01)^{1/2} = 0,52.$$

То есть эффект 5,1 %. Улучшение третьего параметра даст еще меньший эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья не решает всех вопросов проектирования САУ ВТ, а является лишь введением в проблему.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: специальные главы. Учебное пособие. Новосибирск. Издательство НГУ. 2010. 198 с.
- [2] Жмудь В.А. Применение ЦАП и АЦП в системах управления высшей точности. Автоматика и программная инженерия. 2013. 3(5). С. 68–79. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия). <http://www.nips.ru/images/stories/zjournal-AIPI/7/aipi-4-2013-07.pdf>
- [3] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / В. А. Жмудь; Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [4] В.А. Жмудь. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim: учеб. пособие / В. А. Жмудь; Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 124 с.



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru

Automatic Control System of Higher Accuracy

V.A. ZHMUD

Abstract: Systems of automatic control (ACS) operates on the principle of negative feedback. Feedback is based on measuring the output signal (state) of controlled object, comparing it to the specified (desired) value of this state, and use this difference (error) to form the control signal, applied to the object. Thus, the object output affects the input object that generates the control loop or closed loop. The difference between the highest precision ACS (HP ACS) is that in their design focuses on the problems of achieving high control accuracy. This paper gives the basic concepts, problems and methods of designing HP ACS.

Key words: Automation, control, error, mistake, accuracy stabilization

REFERENCES

- [1] V. A. Zhmud'. Jelektronnyye sistemy upravleniya lazernym izlucheniem: special'nye glavy. Uchebnoe posobie. Novosibirsk. Izdatel'stvo NGU. 2010. 198 s.
- [2] Zhmud' V.A. Primenenie CAP i ACP v sistemah upravleniya vysshej tochnosti. Avtomatika i programnaja inzhenerija. 2013. 3(5). S. 68–79. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossija). <http://www.nips.ru/images/stories/zjournal-AIPI/7/aipi-4-2013-07.pdf>
- [3] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravleniya lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / V. A. Zhmud'; Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 s.
- [4] V.A. Zhmud'. Modelirovanie i chislennaja optimizacija zamknutyh sistem avtomaticheskogo upravlenija v programme VisSim: ucheb. posobie / V. A. Zhmud'; Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2012. – 124 s.