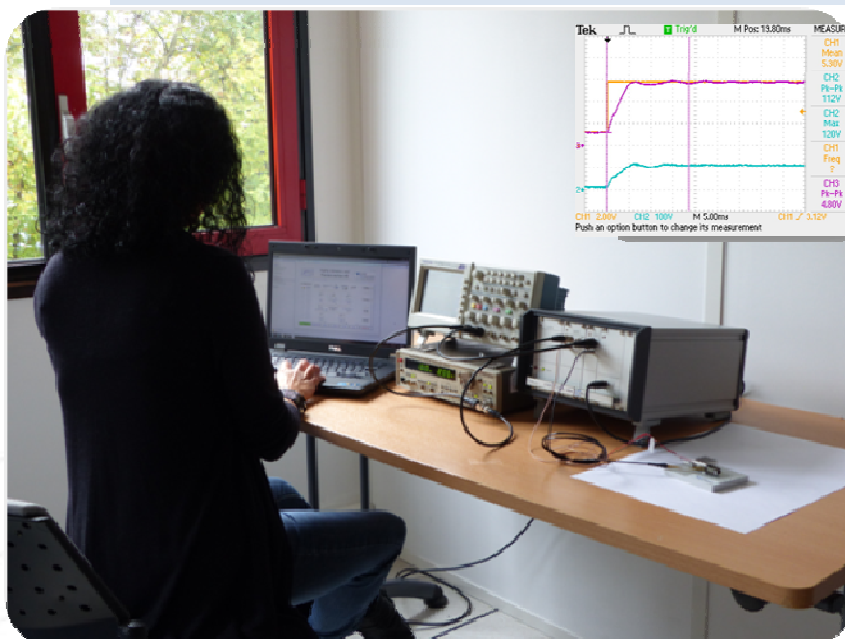


Рекомендации по применению Пьезо Актуаторов при Управлении по Положению



СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
Я ХОЧУ В ПОЛНОЙ МЕРЕ ПОНЯТЬ ЧТО НАХОДИТСЯ В МОИХ РУКАХ	5
Актуатор крупным планом.....	5
Усилитель напряжения крупным планом.....	6
Программное обеспечение.....	6
Пример системы.....	7
Я ТОЛЬКО ЧТО ВСЕ ПОДКЛЮЧИЛ. Я ХОЧУ БЫТЬ УВЕРЕН, ЧТО ВСЕ ПРАВИЛЬНО	9
КАКИЕ ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ НАСТРОЙКИ УСТОЙЧИВОЙ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ?	11
Переходная характеристика.....	11
Время нарастания.....	11
Выброс на фронте импульса.....	11
Время установления.....	11
Установившаяся ошибка.....	11
Синусоидальная реакция системы или диаграмма Боде.....	12
Запасы устойчивости.....	13
Запас устойчивости по амплитуде.....	14
Запас устойчивости по фазе.....	14
МОГУ ЛИ Я ИЗМЕНИТЬ P, I И D ПАРАМЕТРЫ, А ТАКЖЕ ФИЛЬТР, ТАК КАК Я ХОЧУ?..	16
Да, ПИД параметры можно легко изменить.....	16
Но - НЕТ, ПИД параметры нельзя изменять случайным способом.....	16
Я ХОЧУ ЧТОБЫ МОЙ АКТУАТОР ДОСТИГАЛ ПОЗИЦИЮ БЫСТРЕЕ	17
Моделирование: Значения по умолчанию и предлагаемые оптимизированные значения:.....	17
Начальные характеристики.....	17
Преобразование ПИД-параметров.....	17
Интерес к фильтрации.....	19
Итоговая конфигурация.....	20
Эксперимент: величины по умолчанию и предлагаемые оптимизированные.....	21
Частотная характеристика.....	21
Отклик системы в открытой петле.....	22
Отклик системы в закрытой петле.....	23

Я ХОЧУ ДОСТИЧЬ СТАТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ С ОЧЕНЬ ГИБКОЙ СИСТЕМОЙ / ГИБКОЙ СТРУКТУРОЙ	25
КАК Я МОГУ ПОСТРОИТЬ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ?.....	27
Модели систем.....	27
Различные функции	27
Модель актуатора.....	27
Модель усилителя.....	28
Модель датчика.....	28
Модель контроллера.....	29
Параметры модели.....	30
Механические параметры.....	30
Электрические параметры.....	33

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего руководства является помощь пользователю пьезоактуатора в управлении его системой, использующей датчики, усилители и контроллеры CEDRAT TECHNOLOGIES.

Для различных случаев использования приведены основные правила для стабилизации и оптимизации системы при помощи ПИД параметров управления.

Для объяснения основных правил в области управления позиционированием пьезоактуаторов при помощи ПИД-регулятора и связанных фильтров в последней части документа для продвинутых читателей приведены теоретические основы .

В этом руководстве, некоторые значки позволяют Вам быстро получить информацию о:



Для Вашей безопасности и защиты Вашей системы, внимательно относитесь к соблюдению этой информации.

Предупреждение



Эта информация определяет наилучший порядок действий.

Хорошая практика



Пользователь должен внимательно прочитать отдельную инструкцию пользователя на каждую часть системы, составляющей весь контур управления.

Предупреждение

Я ХОЧУ В ПОЛНОЙ МЕРЕ ПОНЯТЬ ЧТО НАХОДИТСЯ В МОИХ РУКАХ

АКТУАТОР КРУПНЫМ ПЛАНOM

Пьезоактуаторы с Интегрированным Рычажным Усилителем перемещения (АРА®) и Параллельно Преднагруженные Актуаторы (РРА) являются активными компонентами, осуществляющими смещение, пропорциональное напряжению. Эти актуаторы состоят из активных частей, сделанных из пьезоэлектрической керамики и пассивных частей, позволяющих преднагрузить пьезокерамику и увеличить смещение (в случае АРА®). В некоторые актуаторы также встроены тензометрические датчики. В этом документе рассматриваются актуаторы с тензодатчиками, вследствие их способности быть частью замкнутой системы.

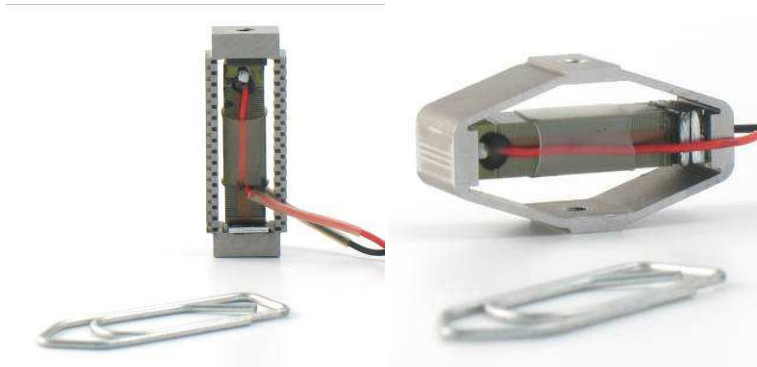


Рисунок 1 Актуаторы PPA20M и ARA40SM

Пьезоактуаторы подключаются к усилителю напряжения с помощью штыревых соединителей. При подаче питания на актуаторы соединители должны быть подключены с учетом полярности.

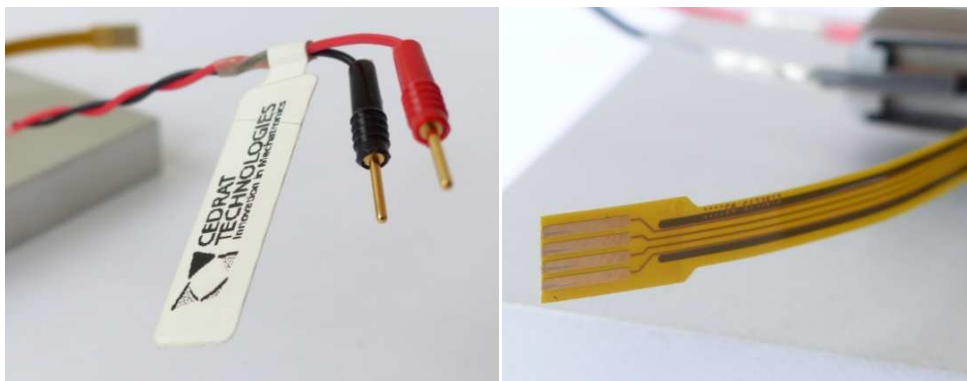


Рисунок 2 Штыревые соединители актуатора и подключение тензодатчика



Предупреждение

Подключите штыревые соединители, таким образом чтобы его металлические части не были видны. Несоблюдение этого предупреждения приведет к риску поражения высоким напряжением. Не меняйте местами красный и черный провода при подключении пьезоактуаторов. Это приведет к неожиданному поведению системы, связанному с риском деполяризации пьезо керамики. Гибкий шлейф не должен быть согнут с радиусом более 5 мм, чтобы избежать отрыва печатных проводников.

УСИЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ КРУПНЫМ ПЛАНОМ

Актуаторы приводятся в действие и контролируются с помощью специальных электронных плат, обычно устанавливаемых в стойку. Каждая стойка электроники обычно состоит из:

- AC-DC преобразователя (LC75 или SC75), обеспечивающего стабилизированное напряжение
- Электронного усилителя напряжения (LA75 или SA75), подающего соответствующее напряжение на актуатор с коэффициентом усиления $\times 20$ В/В.
- Если актуаторы оснащены датчиком положения, то в стойку также встраивается преобразователь датчика положения (SG75 для тензометрического датчика или ECS75 для датчика вихревых токов).
- Когда требуется управление с петлей обратной связи, то встраивается контроллер.

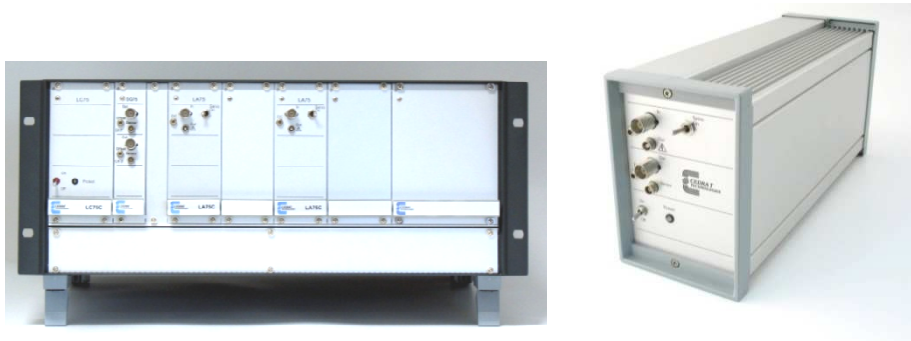


Рисунок 3 Стандартная стойка с несколькими блоками и Компактный Усилитель



До окончания установки не подключайте Ваш пьезоактуатор к стойке. Это позволит Вам избежать риска поражения электрическим током.

Предупреждение

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Управление в замкнутом контуре осуществляется с помощью параметров, которые интегрированы в контроллер. Эти параметры могут быть изменены с помощью специального Графического Интерфейса Пользователя GUI (сокращение от «Graphical User Interface») под названием HDPМ45, который непосредственно влияет на существенные параметры ПЗУ контроллера. Обратитесь к инструкции пользователя на Вашу задающую электронику, чтобы узнать, как установить GUI на вашем ноутбуке.

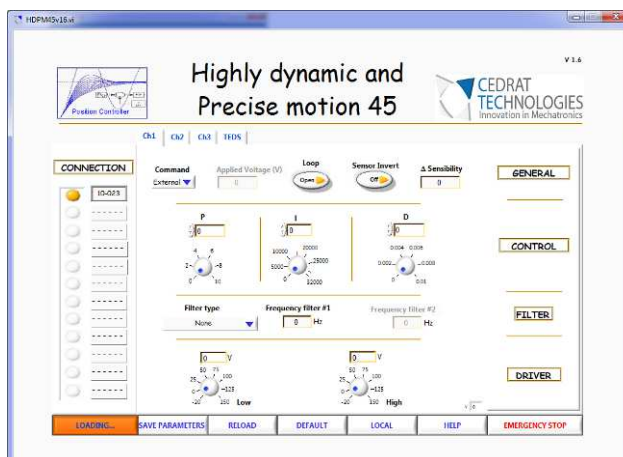


Рисунок 4 Основное меню GUI HDPM45

ПРИМЕР СИСТЕМЫ

На следующих страницах мы рассмотрим несколько ситуаций, которые Вы можете встретить при работе с нашей системой замкнутого цикла. Для того чтобы придать практический контекст, мы будем рассматривать в качестве примера управления по положению пьезоэлектрический привод АРА600М с тензометрическим датчиком SG. Рассматриваемый актуатор представлен на следующем рисунке:

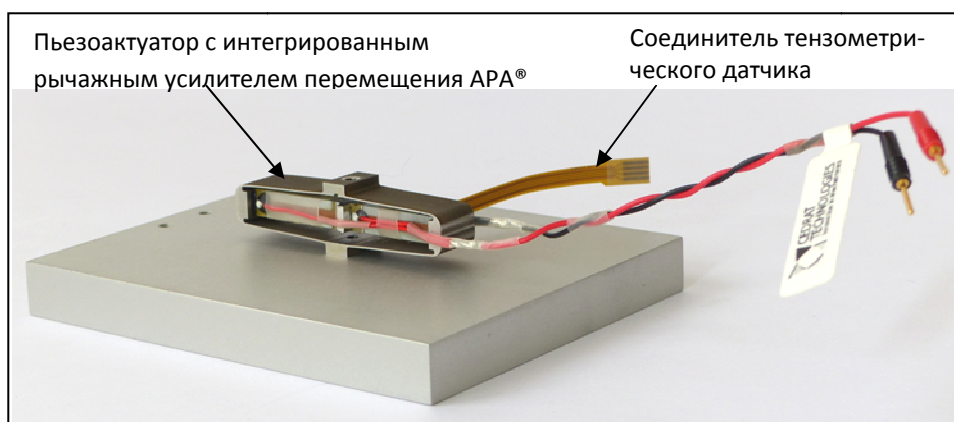


Рисунок 5 Рассматриваемый актуатор, оснащенный тензодатчиком

Работа актуатора обеспечивается с помощью усилителя LA75A, объединенного с контроллером UC45. Сигнал тензометрического датчика преобразуется платой SG75. Порт USB позволяет пользователю настроить параметры контроллера на собственном компьютере с помощью интерфейса пользователя GUI "HDPM 45". Перечисленная аппаратная часть (железо) интегрирована в стойку (рисунок 3).

Тензометрический датчик преобразует деформацию пьезо керамики в напряжение с чувствительностью, измеряемой в мкВ/В. В этом случае замкнутый контур работает с напряжением и наблюдатель/контроллер сравнивает эти напряжения для управления положением актуатора.

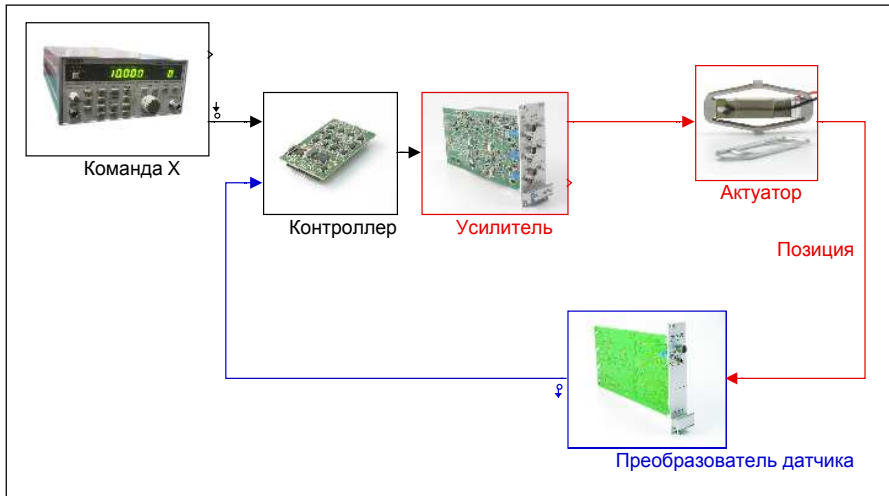


Рисунок 6 Схема компонентов замкнутого контура

Я ТОЛЬКО ЧТО ВСЕ ПОДКЛЮЧИЛ. Я ХОЧУ БЫТЬ УВЕРЕН, ЧТО ВСЕ ПРАВИЛЬНО

Вы строго соблюдали инструкцию, которая была предоставлена и хотите быть уверены, что полученные результаты являются правильными? Пожалуйста, проделайте следующие действия, чтобы получить ответ на Ваш вопрос.

Значения параметров ПИД-регулятора UC45 устанавливаются по умолчанию. Эти параметры настроены на обеспечение стабильных результатов для очень большого набора установок. Они обеспечивают безопасную конфигурацию с низкой скоростью, но высоким запасом стабильности. Эти значения запрограммированы. Эти параметры не оптимизированы для Вашего применения и у Вас есть возможность настроить каждый параметр на соответствие Вашим требованиям (по точности, время установки, ширина полосы ...).

P=0,05
 I=200
 D=0
 Фильтр низких частот @100 Гц

На следующем графике представлена переходная характеристика актуатора на команду, поданную через встроенный датчик. Реакция системы с открытым контуром, представленная в виде красной кривой, показывает колебания, связанные с основной частотой конструкции. Зеленая кривая показывает реакцию системы с замкнутым контуром. Зеленая кривая демонстрирует более медленный, но более гладкий и более стабильный отклик. Поэтому, если вы столкнулись с такой реакцией системы, то Вы можете считать, что текущая конфигурация параметров управления и реализации каждой функции являются правильными.

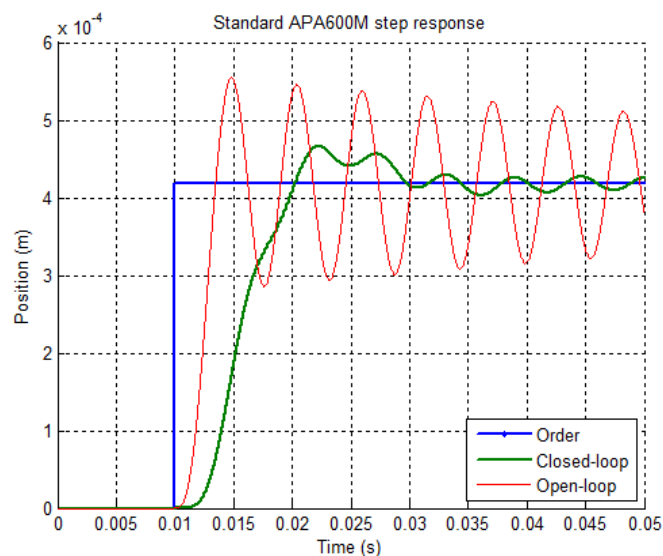


Рисунок 7 Стандартная реакция системы в открытом и закрытом контуре



Хорошая практика

Пожалуйста, используйте сигналы низкого уровня (с размахом амплитуд до усилителя $< 0,5$ В) во время первоначальных испытаний для того, чтобы избежать каких-либо повреждений, на тот случай если настройки не являются правильными. Также в графическом интерфейсе пользователя имеется возможность ограничить выходное напряжение с помощью двух параметров (смотрите следующий Рисунок 8)

Для проверки предустановленных параметров контроллера Вы должны использовать графический интерфейс GUI .

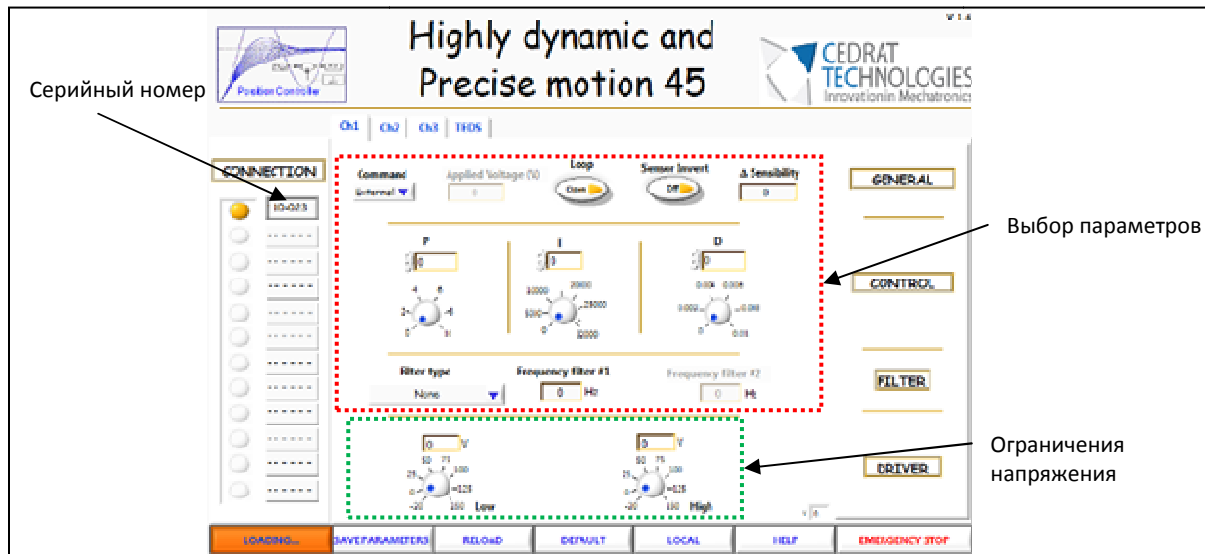


Рисунок 8: установка параметров GUI HDP45

Настройки текущей конфигурации контроллера отображаются в GUI через несколько секунд. Серийный номер отображается на левой стороне. Для настройки доступны параметры ПИД регулятора и параметры фильтра.



Если актуатор производит свистящий звук, то быстро отключите питание актуатора. Вероятно причина в том, что он пришел в резонанс из-за неустойчивости. Если это не так, то проверьте параметры управления и восстановите значения по умолчанию.

Предупреждение

КАКИЕ ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ НАСТРОЙКИ УСТОЙЧИВОЙ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ?

Любая замкнутая система автоматического управления имеет такие характеристики как устойчивость и быстродействие. Анализ данных характеристик позволяет оптимизировать поведение замкнутой системы.

ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Переходная функция является важнейшей характеристикой любой системы автоматического управления, которую можно снять экспериментально. Она несет информацию о времени переходного процесса, времени его нарастания, амплитуде первого выброса и перерегулировании.

Каждый из этих параметров поясняется на следующих графиках на Рисунке 9 и Рисунке 10.

ВРЕМЯ НАРАСТАНИЯ

Время нарастания – это время, которое требуется сигналу, как правило, для перехода от 10% к 90% заданной величины. Обычно во время калибровки замкнутого контура существует зависимость между «Временем нарастания» и «Временем установления».

АМПЛИТУДА ПЕРВОГО ВЫБРОСА

Выброс на фронте импульса - это максимальное значение, достигаемое выше заданной позиции. Уменьшение такого выброса, т.е. уменьшение перерегулировки, - может быть важной задачей для ряда применений из-за механических жестких остановок или других физических ограничений.

ВРЕМЯ УСТАНОВЛЕНИЯ

Время установления - это время, прошедшее с момента идеальной мгновенной подачи "единичного скачка" до момента, при котором выходная реакция системы вошла и осталась в пределах заданного диапазона погрешности. Как правило, диапазон погрешности устанавливается в пределах $100\% \pm 5\%$. На Рисунке 10 можно увидеть, что время установления сигнала одинаково для обеих конфигураций.

УСТАНОВИВШАЯСЯ ОШИБКА

Это разница между желаемым и фактическим состоянием системы на выходе, когда система достигает устойчивого состояния. Сделать эту ошибку равной нулю - является одной из наиболее распространенных задач управления с обратной связью.

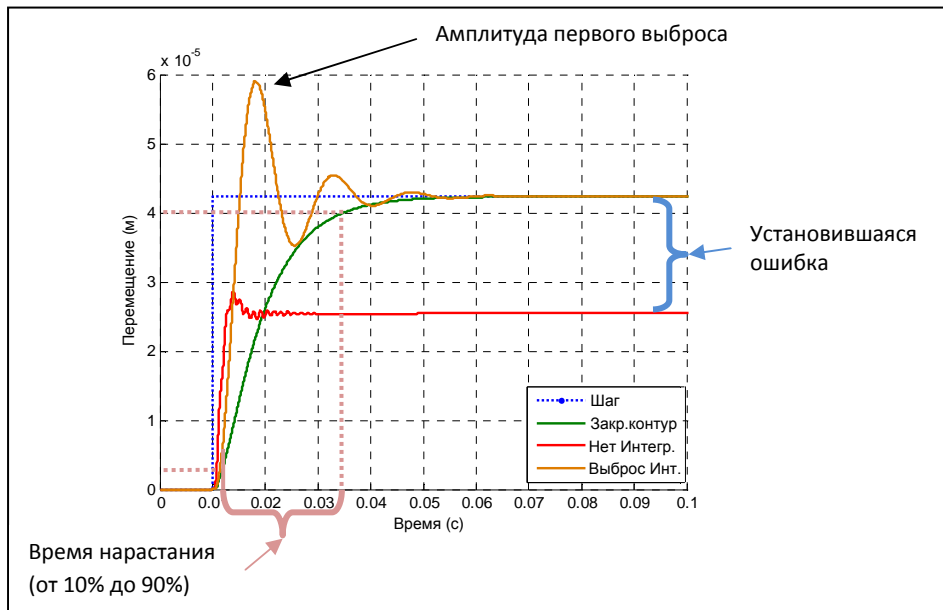


Рисунок 9 Переходная характеристика для примера системы

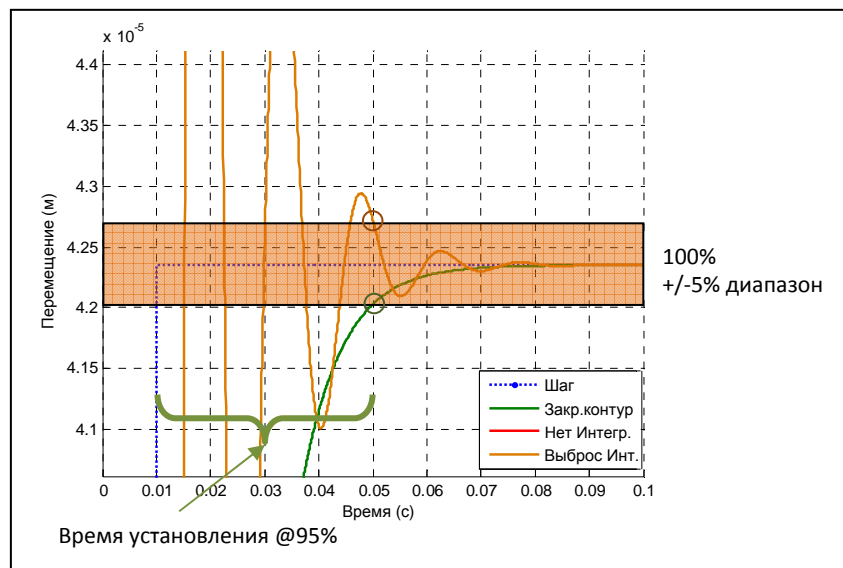


Рисунок 10 Переходная характеристика, установившийся режим крупным планом

Принимая во внимание рассматриваемый случай, требуется отметить, что обычно реакция системы демпфируется и выбросы отсутствуют. При отсутствии интегратора, установившееся положение находится далеко от желаемой позиции. Эта ошибка компенсируется, когда к контроллеру добавляется интегратор (интегральный элемент имеет эффект устранения статической ошибки). Тем не менее, такой контроллер может вводить выбросы на фронте импульса.

СИНУСОИДАЛЬНАЯ РЕАКЦИЯ СИСТЕМЫ ИЛИ ДИАГРАММА БОДЕ

Кроме того, синусоидальный отклик системы интересен для проверки ширины полосы управления, когда могут появиться ошибки амплитуды и запаздывание по фазе. В то же время, так как передаточная функция в открытом контуре не поддается измерению, то диаграмма Боде может предоставить информацию в отношении стабильности петли.

Эти измерения требуют более сложных приборов для отслеживания диаграммы Бode между выходом датчика и командой.

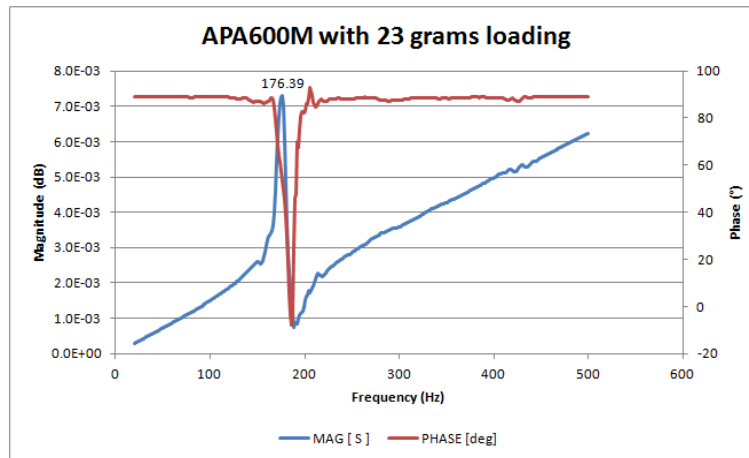


Рисунок 11 Стандартная частотная характеристика по амплитуде и фазе

Амплитуда характеризует уровень деформации и определяется входной командой. Она может быть определена через электрический отклик, посредством измерения полного сопротивления или с помощью внешнего датчика. Фаза представляет собой отставание между командой и ответом. Это один из основных источников нестабильности (см. далее). И, наконец, каждый актуатор представлен как минимум на одной есть собственная резонансная частота. Эта частота характеризуется большим увеличением смещения. Это является источником риска для безопасности актуатора. На этой частоте никогда не должна применяться полная амплитуда.

ЗАПАСЫ УСТОЙЧИВОСТИ

Стабильность контура управления является одной из главных задач конструкторов контроллера. Действительно, эта характеристика является наиболее важной для обеспечения требуемых характеристик управления. Тем не менее, для того, чтобы дать количественную оценку обратной связи на стабильность (вместо того, чтобы говорить о стабильных или нестабильных системах), - было введено понятие запаса устойчивости. Запасы устойчивости выражаются в терминах «запас устойчивости по амплитуде» и «запаса устойчивости по фазе». Обе эти характеристики могут быть получены из диаграммы Бode (в отечественной литературе «ЛАФЧ - логарифмическая амплитудно-частотная характеристика»). Эта диаграмма является графическим представлением величины смещения, например, амплитуды и фазы (разницы между возбуждением и фактическим смещением) в зависимости от частоты. Сочетание этой информации называется Передаточной Функцией Открытой Петли OLTF (англ. Термин «Open Loop Transfer Function») или Передаточной Функцией Замкнутой Петли CLTF (англ. Термин «Closed Loop Transfer Function»). Запасы устойчивости анализируются только с использованием OLTF. Эксперты могут найти подробную информацию о теории управления в инструкции пользователя задающей электроники.

Устойчивость с использованием логарифмического критерия позволяет, построив совмещенно ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы, судить об устойчивости замкнутой системы. Замкнутая система автоматического управления устойчива, если при $L(\omega) > 0$ соответствующая ЛФЧХ проходит таким образом, что фаза не превосходит значения -180° ($-\pi$).

Система устойчивая в разомкнутом состоянии будет устойчивой и в замкнутом, если точка ЛФЧХ определяемая фазой -180° ($-\pi$) соответствует области отрицательных значений логарифмической амплитуды $L(\omega)$.

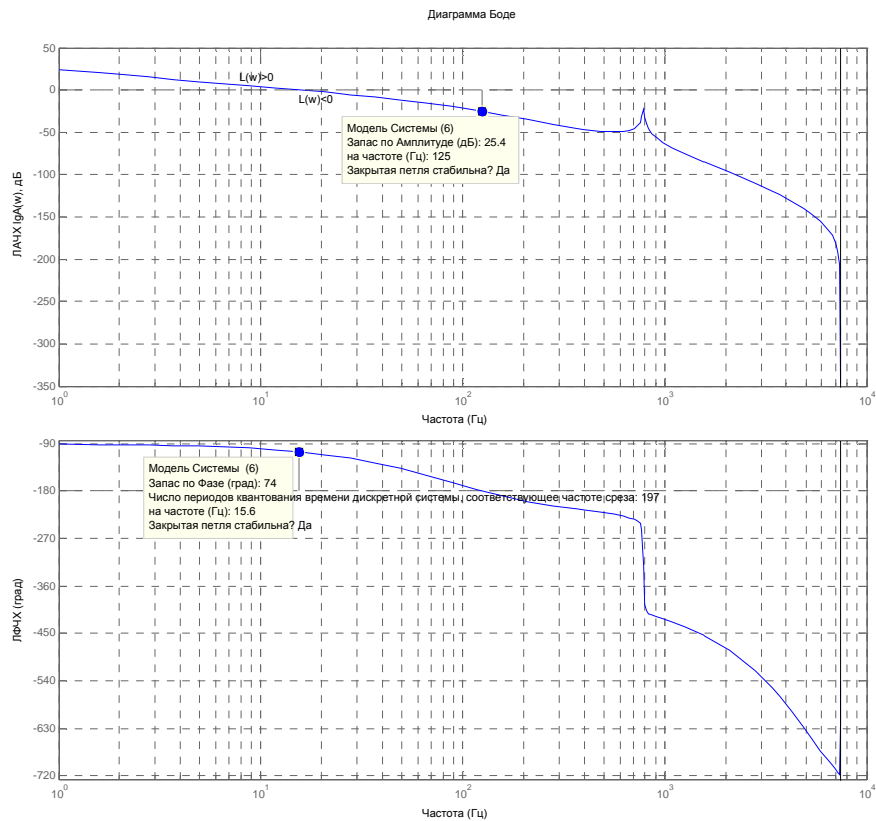


Рисунок 12 диаграмма Бode для примера системы

ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ ПО УСИЛЕНИЮ

Возрастание коэффициента усиления обычно позволяет достичь конечной позиции быстрее. Запас устойчивости по усилению характеризует возможность увеличить коэффициент усиления в системе с замкнутой обратной связью до перехода системы в нестабильное состояние. Запас устойчивости по усилению определяется по ЛАЧХ при значении ЛФЧХ 180° . Если коэффициент усиления отрицательный, то любое воздействие контроллера, которое может быть в неправильном направлении (фаза $>180^\circ$) обладает воздействием магнитуды менее 1. Это слабое воздействие будет не в состоянии сделать систему неустойчивой. В предыдущем примере, запас по усилению составляет 25,4 дБ. Как правило, запас по усилению 3 или 5 дБ можно считать достаточным для пьезоактуатора.

ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ ПО ФАЗЕ

Фаза характеризует задержку между командой и выходом системы. По части фазы риском является то, что контроллер может подавать команду со слишком большой задержкой, таким образом эта команда приходит слишком поздно. Если ЛАЧХ этой команды усиливается (ЛАЧХ > 0 дБ), то система начнет усиливать команду «неправильного направления», что делает систему неустойчивой. Поэтому запас устойчивости по фазе определяется, когда ЛАЧХ пересекает уровень 0 дБ. В предыдущем примере, запас по фазе составляет 74° .

Как правило и в зависимости от применения, запас по фазе в 45° можно считать достаточным. Математическое исследование запасов устойчивости построено вокруг следующих формул:

Закрываая петля м.б. описана как $\frac{T(j\omega)}{1+T(j\omega)}$ где $T(j\omega)$ передаточная функция всей петли соответствующая

передаточной функции контроллера + датчика + драйвера, т.е. $T(j\omega) = TF_{\text{контроллер}}(j\omega) \times TF_{\text{датчик}}(j\omega) \times TF_{\text{драйвер}}(j\omega)$

Рассмотрение знаменателя $1 + T(j\omega) = 0$ или $T(j\omega) = -1$ требует рассмотрения усиления и фазы. Полюса могут быть:

- Если полюса (корни) отрицательные вещественные, то система устойчива.
- Если корни комплексные с отрицательной вещественной частью, то система устойчива.

- Если корни комплексные с положительной вещественной частью, то система неустойчива.

Это исследование может быть аналитически сложным. Критерии устойчивости делятся на две разновидности: алгебраические и частотные. Алгебраические критерии являются аналитическими, а частотные – графоаналитическими. Графоаналитические методы используются для облегчения анализа в сочетании со специализированным программным обеспечением. Инженеры должны оценивать влияние контроллера в части стабильности.

МОГУ ЛИ Я ИЗМЕНИТЬ P, I И D ПАРАМЕТРЫ, А ТАКЖЕ ФИЛЬТР, ТАК КАК Я ХОЧУ?

Прежде чем углубляться в детали, предлагается объяснить, почему СТЕСН предлагает для открытой платформы структуру ПИД + фильтр. ПИД регулятор является самым популярным контроллером в мире. Это простой контроллер реального времени с возможностью настройки различных параметров в режиме реального времени [принимая во внимание реальные характеристики]. Другими словами, имеется возможность простой настройки параметров с помощью следующего метода ручной настройки.

С другой стороны, ПИД-регулятор не является самым лучшим в части характеристик и могут быть внедрены более продвинутое технологии управления, но без сохранения такой же универсальности.

Возвращаясь к вопросу, ответ ДА и НЕТ

ДА, ПИД ПАРАМЕТРЫ МОЖНО ЛЕГКО ИЗМЕНИТЬ

С помощью прилагаемого графического интерфейса пользователя, можно изменить параметры ПИД-регулирования в большом диапазоне. Доступный диапазон параметров описан ниже.

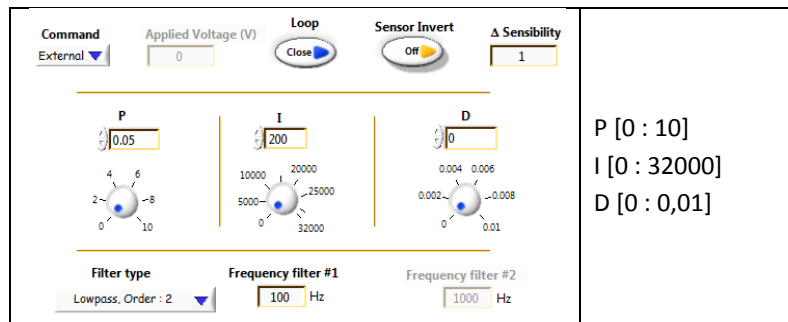


Рисунок 13 выбор параметров GUI и диапазон настройки параметров

В этих диапазонах, параметры не допускают никаких физических ограничений, кроме нестабильности. Нестабильность замкнутой системы управления может привести к повреждениям. Именно поэтому ПИД параметры могут изменяться при соблюдении мер предосторожности.

НО - НЕТ, ПИД ПАРАМЕТРЫ НЕЛЬЗЯ ИЗМЕНЯТЬ СЛУЧАЙНЫМ СПОСОБОМ

Как было замечено ранее, нестабильность определяется значениями ПИД параметров. Влияние каждого из них не так просто уловить. Тем не менее, обычно работают следующие общие правила:

	Время нарастания	Выброс	Время установления	Установившаяся ошибка
Усиление ↗	↘	↗	-	↘
Интеграл ↗	↘	↗	↗	∅
Производная ↗	-	↘	↘	-

Таблица 1 Основные правила ПИД-регулятора



Если вы подбираете параметры для получения наилучших характеристик системы, то запишите последнюю наилучшую конфигурацию для того, чтобы иметь возможность вернуться к хорошо известной отправной точке. Не забывайте, что: «Лучшее - враг хорошего».

Хорошая практика

Я ХОЧУ ЧТОБЫ МОЙ АКТУАТОР ДОСТИГАЛ ПОЗИЦИЮ БЫСТРЕЕ

Как уже было представлено, определение "достижения заданного положения" может быть определено количественно при использовании времени нарастания, времени установления и установившейся ошибки. Эти характеристики могут быть определены по реакции замкнутого контура на сигнал шага. В представленном решении, адаптированные параметры ПИД-регулятора и фильтр представлены с целью повышения характеристик решения.

Основной целью этой части является демонстрация влияния параметров ПИД-регулятора и типа фильтра для получения «быстрого управления».

МОДЕЛИРОВАНИЕ: ЗНАЧЕНИЯ ПО УМОЛЧАНИЮ И ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

НАЧАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ПИД-параметры контроллера UC45 первоначально установлены на значения по умолчанию. Эти параметры обеспечивают характеристики, которые обобщены в следующей таблице.

P	0,05	
I	200	
D	0	
Фильтр	НЧ, 2-го порядка, 100Гц	
Вр.нарастания (10-90%)	14,6	мс
Время установл. (5%)	21,8	мс
Выброс (перерегулир.)	1,2%	

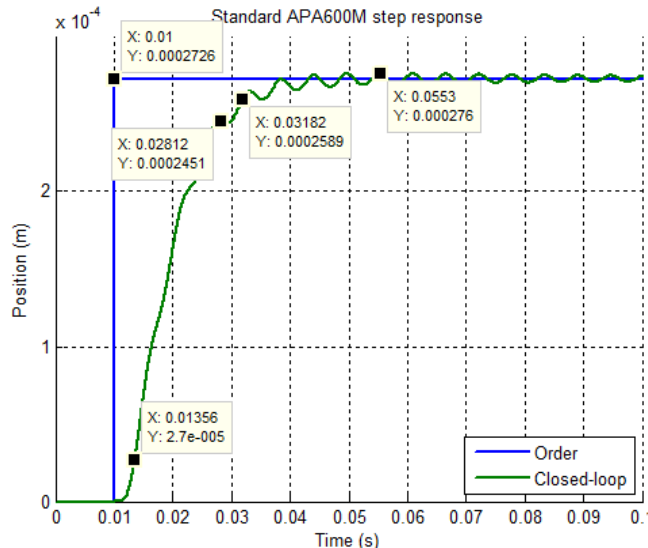


Рисунок 14 Стандартные первоначальные характеристики

Эта реакция системы является консервативной, но относительно медленной и может быть недостаточной, если ваше приложение нуждается в высокой пропускной способности. Поэтому мы рассмотрим влияние ПИД-параметров на возможность сделать ответ быстрее.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПИД ПАРАМЕТРОВ

ПИД-регулятор в основном управляется по Таблице 1. Для ускорения реакции можно:

Найти наименьшее время нарастания: увеличить P и I параметр.

Найти наименьшее время установления: настроить параметр I.

В соответствии с этими двумя случаями, можно увидеть влияние параметров P и I на реакцию системы.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

При увеличении значения коэффициента усиления P , время нарастания уменьшается. Это отчетливо видно на Рисунке 15. Видно также, что такая быстрая реакция не позволяет достичь конечного положения и занимает слишком много времени. Также видно, что для больших значений P колебания нарастают. Это показывает, что запасы устойчивости снижаются.

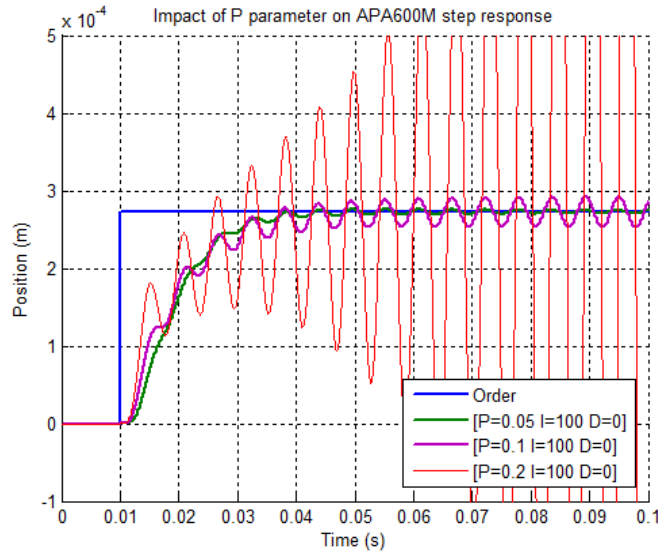


Рисунок 15 Влияние увеличения параметра P

ВЛИЯНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

Интегральный коэффициент усиления I оказывает влияние на время нарастания, поскольку он ускоряет реакцию контроллера, желая отменить стационарную ошибку. Это делается в ущерб времени установления, поскольку он генерирует колебания. Наблюдается большой выброс на фронте импульса в результате перерегулирования системы. Такое поведение системы показано на Рисунке 16.

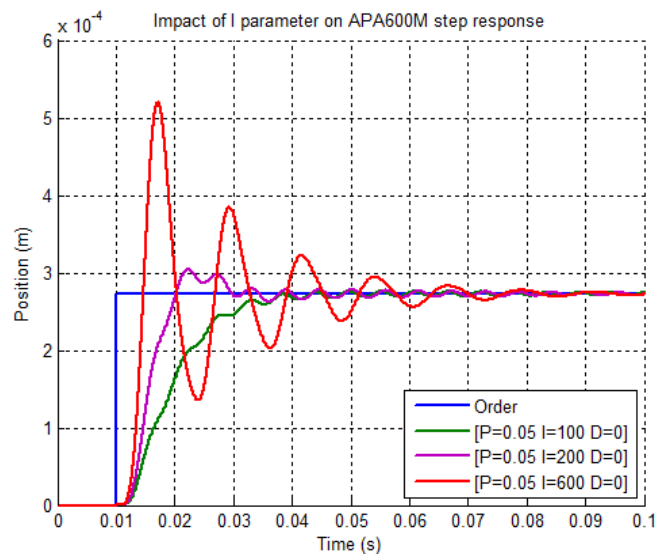


Рисунок 16 Влияние увеличения параметра I

Каждая ПИД конфигурация, предложенная до сих пор, имеет ряд ограничений, с которыми приходится сталкиваться при необходимости повышения скорости. В следующей главе мы видим влияние фильтрации для повышения скорости при сохранении стабильности в контуре управления.

ИНТЕРЕС
К
ФИЛЬТРАЦИИ

Было продемонстрировано, что ПИД параметры определяют скорость реакции, но они также вносят энергию в колебания системы. Такие колебания плохо / отрицательно влияют на стабильность и характеристики системы. Поэтому стратегия управления состоит в добавлении фильтра к ПИД-регулятору для уменьшения влияния таких режимов.

Первым типом фильтра, который был реализован до сих пор в качестве установленного по умолчанию, является **фильтр нижних частот 2-го порядка**. Этот вид фильтра способен обрезать высокие частоты, но является не очень эффективным, когда сильный и точный режим близок к рабочим частотам. Решение может состоять в уменьшении частоты среза этого фильтра, но это также может замедлить реакцию системы. Другим решением является использовать другой тип фильтра под названием "режекторный фильтр".

Режекторный фильтр является заграждающим узкополосным фильтром, настроенным на определенную частоту. Контроллеры CEDRAT TECHNOLOGIES совместимы с режекторными фильтрами 2-го и 4-го порядка. Они демонстрируют преимущества, заключающиеся в сохранении коэффициента усиления и фазы далеко за пределами от частоты среза. Это приводит к потенциально большому запасу устойчивости.

Следующий рисунок показывает отклик системы с параметрами $[P, I, D] = [0,05; 100; 0]$. Видно, что малая частота фильтра низких частот уменьшает эффективность управления, потому что делает управление слишком медленным. Частота среза 75 Гц позволяет достичь наилучших характеристик. Дополнительно представлены показывающие хорошие результаты заграждающие фильтры 2-го порядка и 4-го порядка.

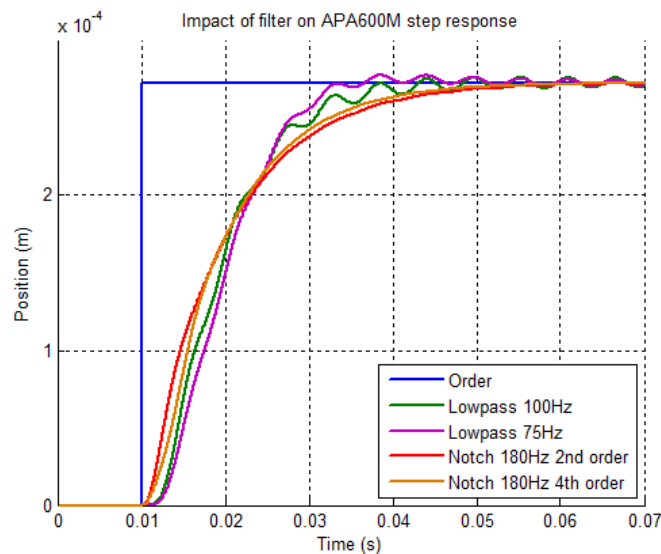


Рисунок 17 Влияние типа фильтра

Различие в диаграмме Боде (ЛФЧХ) между стандартным фильтром 100 Гц и заграждающим фильтром 4-го порядка представлено на Рисунке 18. Легко увидеть, что зеленая кривая (заграждающий фильтр) сильно уменьшает ЛАЧХ и увеличивает запасы устойчивости по фазе и по коэффициенту усиления.

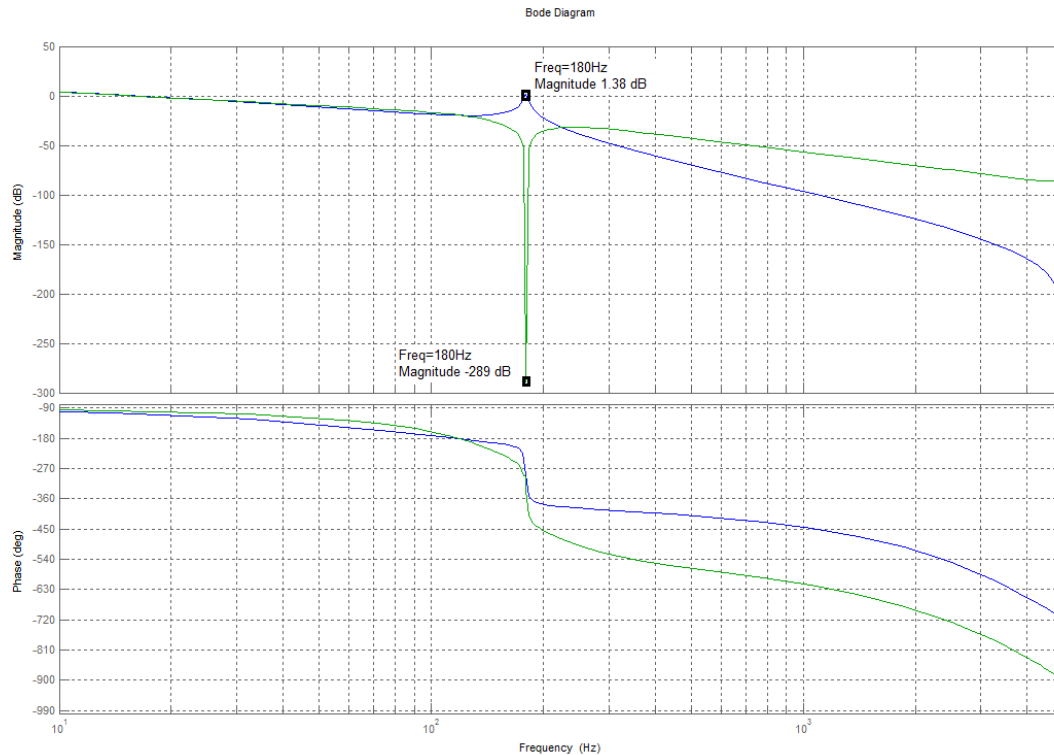


Рисунок 18 Сравнение между стандартным и заграждающим фильтром

ИТОГОВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ

Эффективная конфигурация управления может быть получена при объединении оптимизации ПИД-регулятора и фильтрации. В стандартной ситуации перед изменением параметров ПИД-регулятора вероятно будет проще подобрать фильтр с учетом паразитного режима. В рассматриваемом примере сохраняемые параметры объединены в Таблице 2.

	Оптимизированные	Предустановленные
P	0,27	0,05
I	310	200
D	0	0
Фильтр	Режек. 4 порядка 180Гц	НЧ, 2 порядка 100 Гц
Время нарастания (10-90%)	3,3 мс	14,6 мс
Время установки (5%)	5,3 мс	21,8 мс
Выброс	2,5%	1,2%

Таблица 2 Пример оптимизированных параметров и характеристик

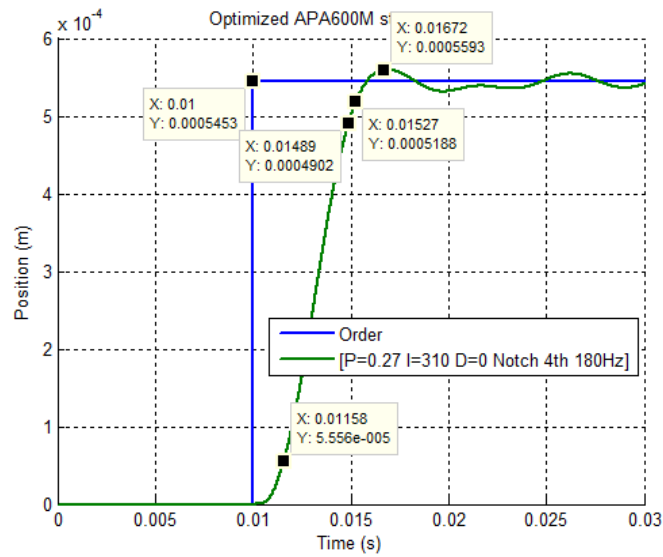


Таблица 3 Характеристики предлагаемой оптимизированной конфигурации

ЭКСПЕРИМЕНТ: ВЕЛИЧИНЫ ПО УМОЛЧАНИЮ И ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ

Теперь, когда моделирование помогло нам определить интересные результаты, необходимо применить эти параметры к реальной системе. В нашем случае используется пример системы (представлена на странице 7).



Рисунок 19 Полная настройка управления

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Перед применением каких-либо продвинутых команд, рекомендуется проверить частотную картину рассматриваемого актуатора. В нашем примере основная частота была спрогнозирована на значении 180 Гц. В результате измерений была получена частота 176,4 Гц, что является очень хорошим показателем.

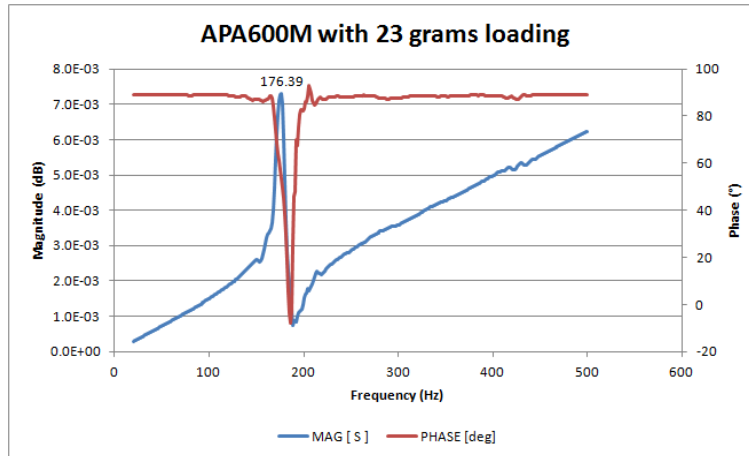


Рисунок 20 Влияние частоты полосового фильтра на передаточную функцию замкнутого контура

ОТКЛИК СИСТЕМЫ В ОТКРЫТОЙ ПЕТЛЕ

Вначале система испытывается в открытой петле. Такой отклик системы является очень простым способом обеспечения работы пьезоактуатора, без какой-либо обратной связи о поведении актуатора. Результат отображен ниже.

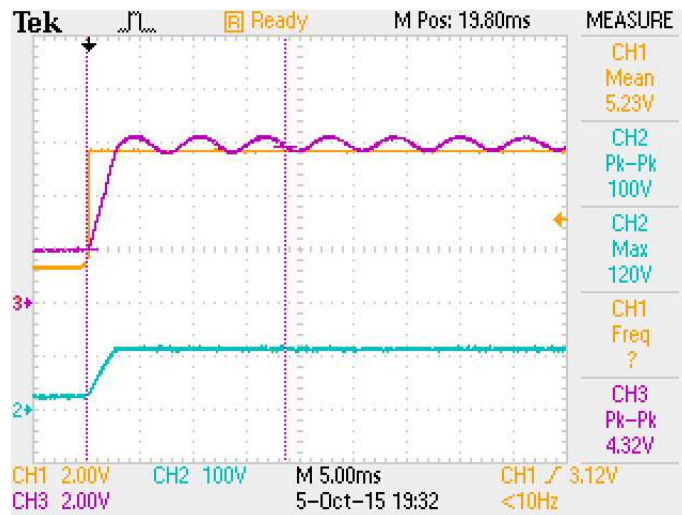


Рисунок 21 Отклик системы в открытой петле

Видно, что колебания появляются после того, как напряжение увеличивается. Напряжение увеличивается линейно из-за ограничения тока задающей электроники.

Примечание: Не следует путать ответ разомкнутого контура с анализом разомкнутого контура при анализе стабильности.

ОТКЛИК СИСТЕМЫ В ЗАКРЫТОЙ ПЕТЛЕ

ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

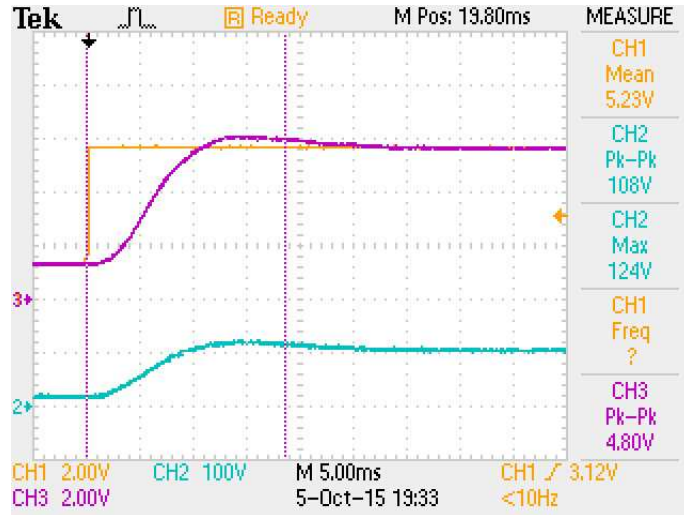


Рисунок 22 Реакция системы при исходных параметрах

Измеренный ответ системы незначительно отличается по сравнению с моделированным (см. Рисунок 7). Основное различие происходит из-за низких колебаний, которые не видны на полученных данных.

ПРЕДУСТАНОВЛЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Некоторые адаптированные параметры были predetermined при помощи моделирования для достижения наиболее быстрого времени отклика.

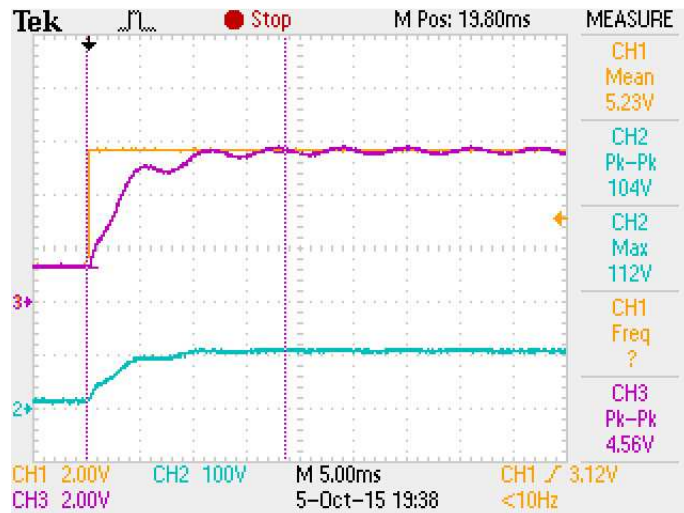


Рисунок 23 Реакция системы с предустановленными параметрами

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Различие между моделированием и настройками в эксперименте приводит к неоптимальным результатам с использованием predetermined параметров. Таким образом, чтобы сократить время отклика производится локальная оптимизация.

Параметры изменяются на [P = 0,3, I = 400; D = 0, Фильтр = Режекторный 4-го порядка, 140 Гц]

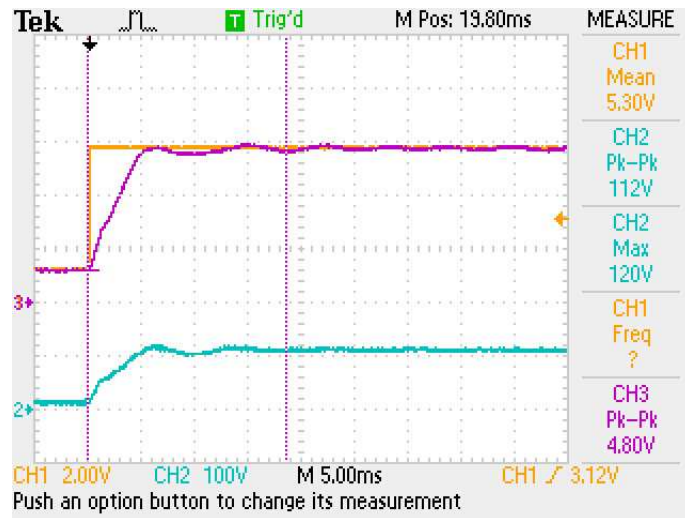


Рисунок 24 Реакция системы с оптимизированными параметрами

При использовании этих параметров было получено время отклика 5 мс. Это значение 5мс соответствует периоду $1 / Fr$. Такое время отклика удовлетворяет динамичной системе.

Я ХОЧУ ДОСТИЧЬ СТАТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ С ОЧЕНЬ ГИБКОЙ СИСТЕМОЙ / ГИБКОЙ СТРУКТУРОЙ

Для случая, когда высокая точность статического позиционирования является единственной целью замкнутого контура, могут быть применены несколько правил для получения полностью удовлетворительного поведения. Иногда используются очень гибкие/мягкие (низкая жесткость) структуры, что приводит к низким резонансным частотам. Например, это тот случай, когда используются рычаги с большим плечом.

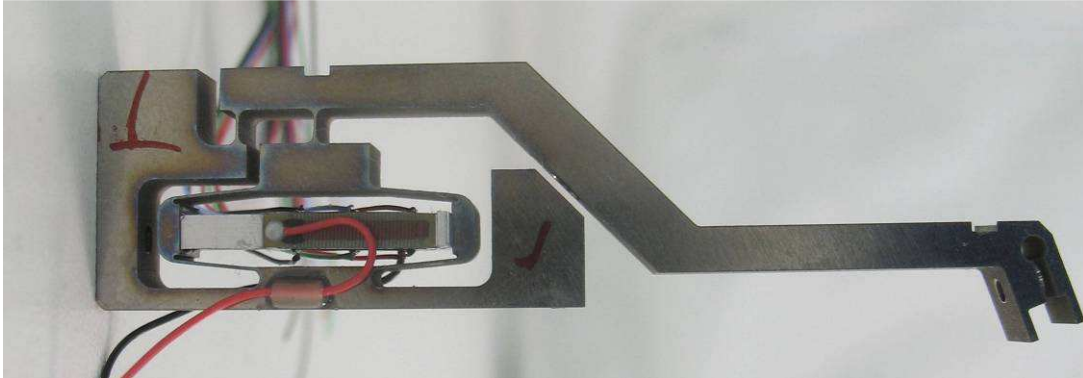


Рисунок 25 Пример механизма с большим рычажным механизмом, с более низкой резонансной частотой

В стандартном случае с исходными параметрами, замкнутый контур может быть неустойчивым, если резонансная частота очень мала. На следующем примере (Рисунок 26), рассматривается система с резонансной частотой 55 Гц. В то время как реакция открытой петли показывает большие колебания (красная кривая), актуатор в итоге достигает заданного положения. Напротив, реакция замкнутого контура увеличивается без видимого предела. Контроллер не может компенсировать динамику системы и она становится нестабильной.

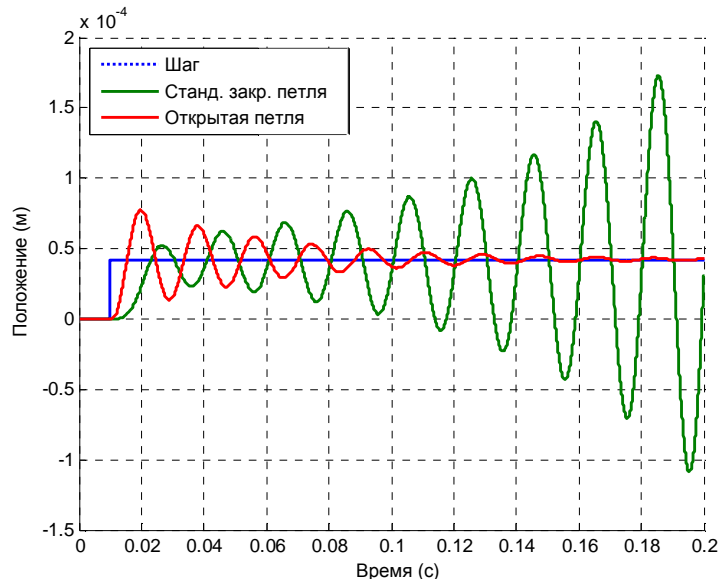


Рисунок 26 Реакция системы с низкой резонансной частотой

Для того, чтобы восстановить стабильность, необходимо адаптировать параметры к характеристикам системы. Низкая резонансная частота легко подавляется при более низкой частоте среза фильтра нижних частот. Тем не менее, так как остается перерегулирование системы (Рисунок 27), требуется немного уменьшить интегральную составляющую контроллера (со 100 до 30). Эта окончательная корректировка I ведет к уменьшению наклона характеристики и к хорошей подстройке к команде.

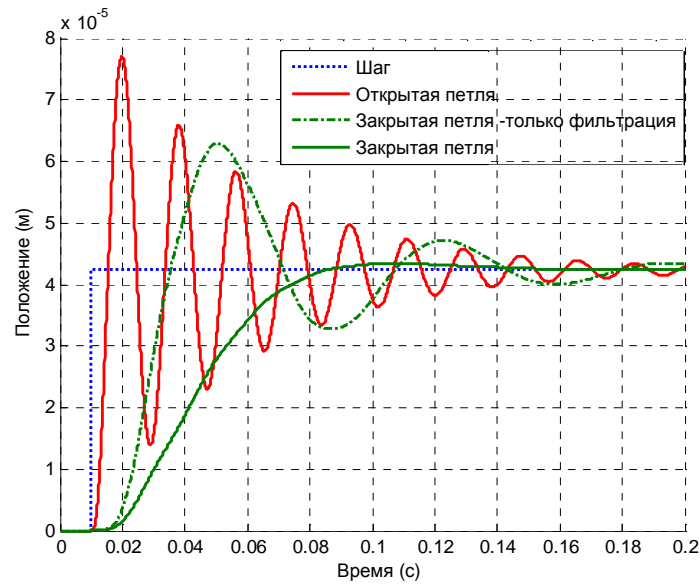


Рисунок 27 Предложение по решению для системы с низким резонансом



Если актуатор производит сильный свистящий звук, то требуется немедленно отключить питание. Этот резкий звук возникает из-за резонансных частот системы, которые возбуждаются из-за потери стабильности управления. Проверьте параметры управления и при необходимости восстановите значения по умолчанию.

Предупреждение

КАК Я МОГУ ПОСТРОИТЬ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ?

МОДЕЛИ СИСТЕМ

РАЗЛИЧНЫЕ ФУНКЦИИ

Принципиальная схема одноканального контура управления включает в себя следующие блоки (см. Рисунок 20):

- Актуатор
- Усилитель
- Датчик и преобразователь сигнала датчика положения
- Контроллер включает
 - Два аналого-цифровых преобразователя (АЦП) включая фильтры защиты от наложения спектров (антиалиасные фильтры). Эти блоки характеризуются выборкой и хранением и функциями квантования (квантование является функцией разрешения АЦП, обычно 16 бит). Эти преобразователи используются для дискретизации аналоговых команд и сигналов обратной связи.
 - Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с разрешением 16 бит предназначен для преобразования цифровой команды в аналоговую команду, подаваемую на актуатор. Этот блок, как правило, характеризуется максимальным диапазоном и разрешением в битах.
 - Регулятор, который вычисляет ошибку между командой и реальным положением, регистрируемым датчиком. Контроллер рассчитан на поддержание требуемых характеристик (точность, скорость, ...) стабильного замкнутого контура. Он включает в себя несколько регуляторов на основе аналоговых /цифровых преобразователей и робастный ПИД-контроллер.

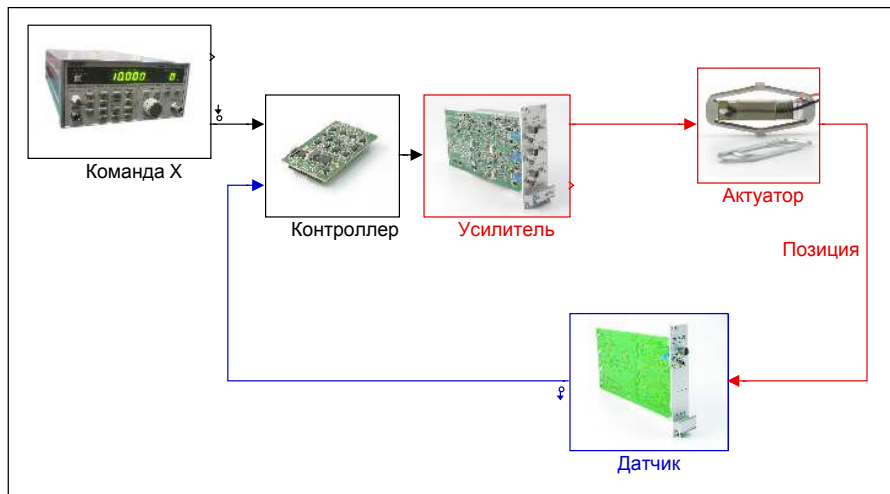


Рисунок 28 Схема основного цифрового контура управления

Каждый блок представлен с входом и выходом, чтобы смоделировать их поведение.

МОДЕЛЬ АКТУАТОРА

Прежде чем анализировать поведение системы в петле, первым шагом является определение модели и ее точности. В квазистатическом режиме можно использовать модель пьезоактуатора с его основной частотой (см уравнение 1).

$$H(j\omega) = \frac{u}{V} = \frac{Nc_m}{1 + r_m c_m j\omega + m_m c_m (j\omega)^2}$$

Уравнение 1: Передаточная функция актуатора

Эта передаточная функция представляет смещение актуатора в зависимости от приложенного напряжения на керамике. Эта передаточная функция, конечно, является линейной и не принимает во внимание влияние эффект ползучести или присущий гистерезис. (При необходимости для моделирования мы рекомендуем использовать программное обеспечение для учета этих нелинейностей). В первом приближении гистерезис для пьезоэлектрического актуатора близок к 10% и мы предполагаем, что линейный контроллер способен эффективно корректировать этот эффект. В более точной модели, читатель может принять во внимание эту нелинейность при работе с конкретной моделью. Имейте в виду, что модель характерна для одного воздействия. Когда окружающая среда оказывает влияние на характеристики указанной модели, то должна использоваться параметрическая модель.

Кроме того, когда требуют динамические характеристики или когда требует используемый механизм, актуатор должен быть смоделирован не только на его первой механической частоте. В этом случае, только моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в сочетании с выделением электромеханических элементов могли бы дать общую передаточную функцию механизма.



Когда требуется малое время установления, то для настройки контура управления вследствие паразитных колебаний в системе, модель с сосредоточенными параметрами (на основе одного режима) может быть не достаточно точной. Мы настоятельно рекомендуем проводить модальную идентификацию/анализ с программным обеспечением для анализа модели механизма Методом Конечных Элементов или процесс идентификации железо-в-петле, для того чтобы принять в расчет другие режимы на более высокой частоте.

Хорошая практика

МОДЕЛЬ УСИЛИТЕЛЯ

В первом приближении (для квазистатического приложения) задающая электроника обеспечивает чистое усиление. Вы должны интегрировать ограничение тока на выходе, частоту среза задающей электроники, когда система требует полосу пропускания или нелинейностей, таких как ограничение выходного напряжения.

$$\text{Усилитель}(j\omega) = \frac{V_{\text{вых}}}{V_{\text{х}}} = 20$$

Уравнение 2 Функция передачи усилителя

Примечание: Не следует путать полосу пропускания мощности с полосой пропускания сигнала. Первая из них характеризуется ограничением тока и максимальная частота синусоиды может быть записана в виде

$$F_{\text{max}} = \frac{I_{\text{max}}}{V_{\text{pp}} \times \pi \times C_{\text{piezo}}}$$

МОДЕЛЬ ДАТЧИКА

Датчик может быть представлен с коэффициентом усиления, объединенным с фильтром нижних частот первого порядка. Если вы используете тензометрический датчик производства CEDRAT TECHNOLOGIES (SG75 плату), то его коэффициент усиления определяется следующим образом:

$$\text{Датчик}(j\omega) = \frac{V_{\text{вых}}}{V_{\text{х}}} = \frac{\text{Максимальный_ход}}{\text{Максимальное_входное_напряжение}}$$

Уравнение 3 Передаточная функция датчика

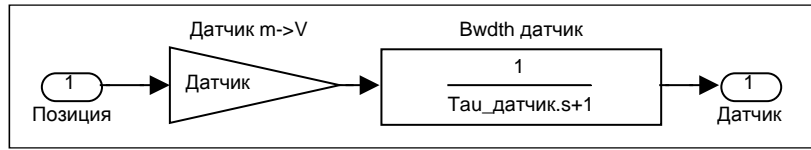


Рисунок 29 Модель датчика

Численное представление: Для APA120ML, максимальный ход составляет 120 мкм, а максимальная команда напряжения 8,5 В: Коэффициент усиления 70833 В/м

МОДЕЛЬ КОНТРОЛЛЕРА

Контроллер включает в себя ПИД-регулятор последовательно со специализированным фильтром. Фильтр расположен последовательно, чтобы ограничить эффект резонансной частоты актуатора. Если актуатор обладает низким коэффициентом добротности или если его пропускная способность очень мала, то этот фильтр может быть шунтирован и только корректировка ПИД параметров будет оптимизировать поведение петли за счет снижения интегрального параметра (играет роль интегратора, т.е. фильтра низких частот).

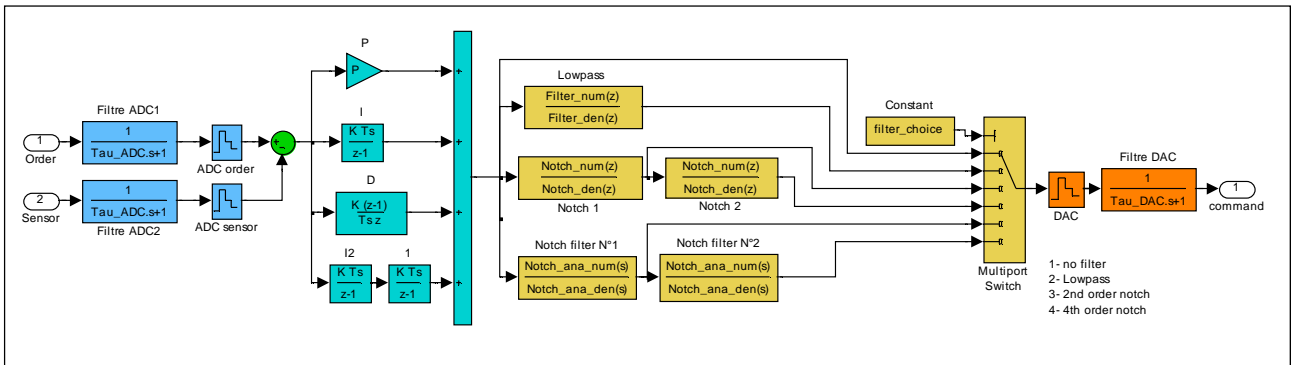


Рисунок 30 Модель контроллера

ПИД-регулятор пытается исправить ошибку между измеренной переменной процесса и желаемой точкой настройки путем вычисления и последующего вывода корректирующего действия, которое может соответствующим образом настраивать процесс.

Он используется для обеспечения оптимального поведения отклика актуатора к его команде – уменьшая ошибку в скорости, в ускорении и в основном - в положении.

Наконец, контроллер встроен в цифровой области и поэтому дискретная передаточная функция должна быть использована для реализации P, I, D функций блока.

Влияние I условия Влияние P условия Влияние D условия

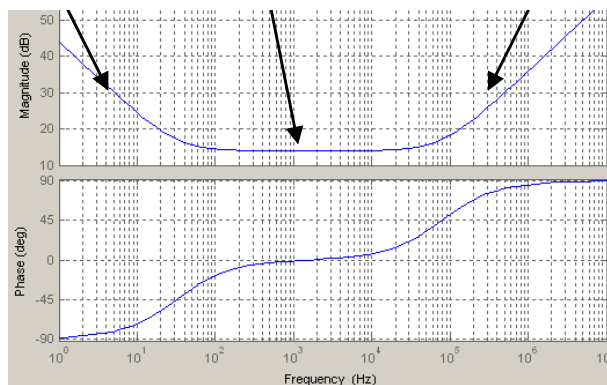


Рисунок 31 Частотная характеристика контроллера, влияние P, I и D

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Механические параметры системы могут быть определены с помощью нескольких различных методов. Целью этого шага является получение поведения системы для частоты первого порядка.

Во-первых, в первом приближении могут быть применены теоретические значения. Эти параметры можно найти в каталоге (см. Рисунок 32). Жесткость **K**, Ход, Добротность **Q** и емкость **Сpiezo** являются основными характеристиками, которые необходимо учитывать. Резонансная частота **fr0** в режиме blocked-free (с условно жестко заблокированной одной стенкой актуатора) также используется для того, чтобы определить эффективную массу **m** актуатора. Масса полезной нагрузки объекта **M**, которую требуется позиционировать играет главную роль в поведении системы. Ход дает информацию о статическом коэффициенте усиления **Gstatic** актуатора, путем деления хода на максимальную амплитуду напряжения (обычно в размахе амплитуд 170 В).

PROPERTIES	STANDARD TECHNICAL CONDITIONS	UNIT	NOMINAL VALUES
Notes		-	0
Max. no load displacement	Quasistatic excitation, blocked-free	μm	618
Blocked force	Quasistatic excitation, blocked-free	N	26.3
Stiffness	Quasistatic excitation, blocked-free	N/μm	0.043
Resonance frequency (free-free)	Harmonic excitation, free-free, on the admittance curve	Hz	1306
Response time (free-free)		ms	0.38
Resonance frequency (blocked-free)	Harmonic excitation, blocked-free, on the admittance curve	Hz	318
Response time (blocked-free)		ms	1.57
Capacitance	Quasistatic excitation, free-free, on the admittance curve	μF	3.15
Max. no load displacement at resonance	Max. harmonic excitation, free-free	μm p-p	289
Max. voltage at resonance	Max. harmonic excitation, free-free	Vrms	9.00
Force limit (0-pk)	Max. harmonic excitation, free-free	N	6.83
Resolution	Quasistatic excitation	nm	6
Height (in actuation direction)		mm	14.60
Length		mm	48.50
Width (excl. wedge & wires)		mm	10.00
Width (incl. wedge & wires)		mm	12.00
Mass		g	14.2

Рисунок 32 Вырезка из каталога с параметрами актуатора

Передаточная функция актуатора характеризуется системой пружина-демпфер-масса следующим образом:

Определение эффективной массы m	$f_{r0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \Leftrightarrow m = \frac{K}{(2\pi \cdot f_{r0})^2}$
Резонансная частота системы	$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M+m}}$
Коэффициент добротности	$Q=100$ условно и в результате экспериментов или измерений
Передающая функция	$FT(j\omega) = \frac{G_{static}}{(\tau \cdot j\omega)^2 + \tau/Q \cdot j\omega + 1}$
	где $\tau = \frac{1}{2\pi \cdot f_r} = \sqrt{\frac{M+m}{K}}$

Уравнение 4 Резонансная частота и передаточная функция

Используемые механические параметры объединены в следующей таблице. Обычно эти значения могут быть найдены в каталоге, или заводской поверочной ведомости, поставляемой с актуатором.

Параметр	Величина	Ед.изм.	Примечание
Актуатор (АРА600М)			
Ход	618	мкм	
Жесткость K	0,04349	Н/мкм	
Резонансная частота f_{r0}	318	кГц	Режим blocked-free
Емкость C_{piezo}	3,15	мкФ	
Коэффициент добротности Q	100	-	Стандартная величина $Q=100$ для низковольтного возбуждения; $Q=30 - 50$ для высоковольтного возбуждения
Эффективная масса	11.8	г	Используя уравнение 4

Таблица 4 Характеристики актуатора

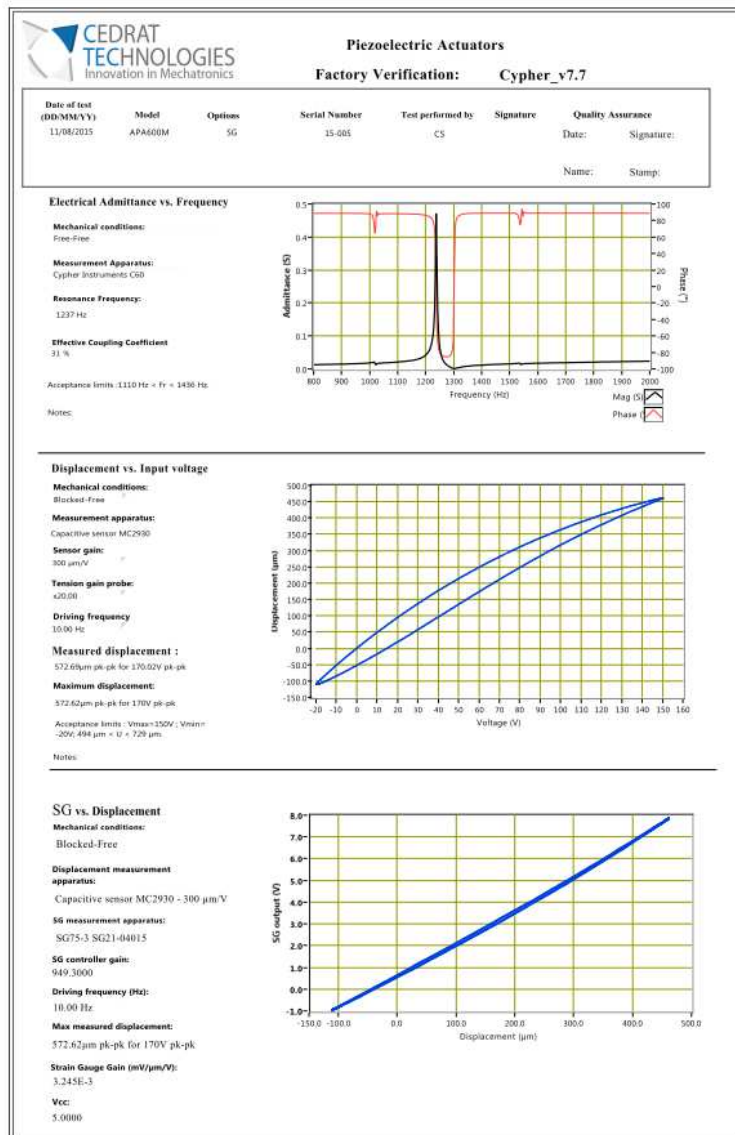


Рисунок 33 Заводская проверочная ведомость в поставке СТЕСН

В режиме blocked-free, рассматриваемом в нашем случае, частотная характеристика анализируется с использованием анализатора полной проводимости. Такого рода аппарат полезен при идентификации пьезо механизма, поскольку он позволяет получать информацию о пьезо возбуждаемых режимах структуры.

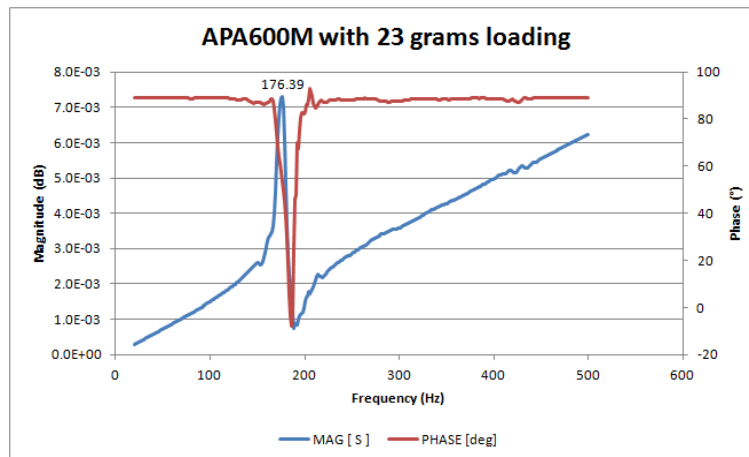


Рисунок 34 Измерение проводимости рассматриваемой системы

Для более сложных или детализированных систем, элементарная модель может оказаться недостаточной. Может оказаться необходимым учитывать определение форм колебаний механизма с программным обеспечением Методом Конечных Элементов или процесс идентификации железо-в-петле и другие режимы на более высоких частотах для лучшего соответствия реальному поведению в области применения.

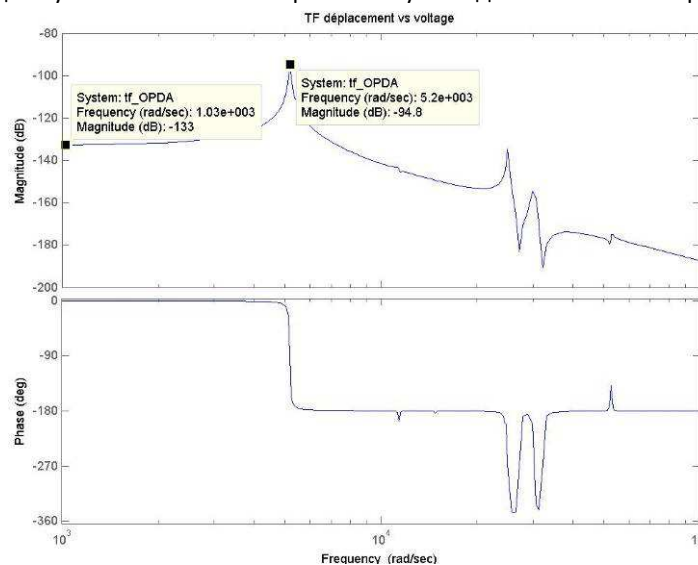


Рисунок 35 Определение форм колебаний механизма с несколькими степенями свободы

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Электрические параметры разбиваются на 2 категории: сигнал и мощность. Данные сигнала, например, относятся к АЦП и ЦАП преобразователям, полосе пропускания датчика и к коэффициенту усиления. Данные о мощности относятся к ограничениям тока, напряжению насыщения. Эти параметры в основном управляются аппаратными средствами (Стандартные значения приведены в Таблице 5). Ограничения по управлению, вызванные этими данными изменяются от одной конфигурации к другой.

Параметр	Величина	Ед.изм.	Примечание
Контроллер (UC45)			
Частота дискретизации			
частота фильтра АЦП	100	кГц	НЧ первого порядка
частота фильтра ЦАП	5	кГц	НЧ первого порядка
P, I, D	-		See §XXXX
Фильтр	-		See §XXXX
Усилитель (LA75A)			
Коэффициент усиления	20		
Частота среза – слабый сигнал	33	кГц	НЧ первого порядка
Насыщение макс. напряж.	+150	В	
Насыщение мин. напряж.	-20	В	
Ограничение по току	90	мА	Обратитесь к каталогу CTEC для получения ограничения по току различных усилителей (ширины полосы мощности). Пример для LA75A.
Датчик (SG75)			
Коэффициент усиления	8,5/на полный ход		Коэф. усиления адаптирован к величине деформации полного хода и может быть получен из заводской поверочной ведомости
Частота среза	15	кГц	НЧ первого порядка

Таблица 5 Значения стандартных электрических параметров

