

Настройка системы управления в Simulink

Паскаль Гахинет, Аркадий Туревский, MathWorks

В статье рассмотрен автоматизированный метод настройки параметров сложной системы управления с помощью графической среды имитационного моделирования Simulink, которая позволяет решать весь комплекс задач от разработки концепции модели до тестирования, проверки и генерации кода.

Настройка системы управления может оказаться довольно сложной задачей, если полагаться только на собственный опыт и заниматься отладкой каждого элемента системы вручную. В частности, это касается систем управления со множественными цепями обратной связи или настраиваемыми компонентами, как, например, в случае каскадных ПИД-регуляторов, систем управления с прямыми и обратными связями или контуров управления МИМО-систем с выраженными перекрёстными связями. Обычно разработчики занимаются настройкой одновременно только одного элемента или контура управления. Помимо того что данный подход требует выполнения множества итераций и отнимает много времени, он не гарантирует достижение оптимального результата. Кроме того, специалист, использующий при разработке системы эту методологию, должен обладать солидным опытом работы.

Используя в качестве примера систему управления полётом вертолёта, рассмотрим системный и автоматизированный подход к настройке одновременно всех параметров системы с учётом стандартных требований к производительности и надёжности.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ ВЕРТОЛЁТА: АРХИТЕКТУРА И ТРЕБОВАНИЯ

На рисунке 1 показана блок-схема системы управления полётом вертолёта, смоделированная в графической среде Simulink. Динамические характеристики вертолёта моделируются в блоке Helicopter. Система управления полётом формирует команды ds , dc , и dT в градусах, соответственно, для продольного управления циклическим шагом несущего винта, бокового управления циклическим шагом несущего винта и управления хвостового рулевого винта. Управление основывается на измерениях следующих параметров: угла тангажа (θ), угла крена (ϕ), скорости крена, тангажа и рыскания (p , q и r). Контроллер состоит из двух контуров обратной связи. Внутренний контур (блок обратной связи со статическим выходом (SOF), обозначенный светло-голубым цветом) обеспечивает повышение устойчивости и развязку. Внешний контур (блоки PI, обозначенные оранжевым цветом) обеспечивает отслеживание уставки на заданном уровне.

Можно выделить следующие требования к системе управления:

- отслеживание изменений уставки по параметрам θ , ϕ и r с нулевой установившейся ошибкой, временем регулирования не более двух секунд, минимальным перерегулированием и минимальной перекрёстной связью;
- обеспечение по всем переменным достаточных запасов по амплитуде и фазе;
- ограничение полосы пропускания замкнутой системы для предохранения от воздействия высокочастотных помех из-за движения винта и шумов измерений.

Чтобы частично обеспечить соблюдение третьего пункта требований, в системе управления полётом используется фильтр нижних частот (ФНЧ) с отсечкой в 40 рад/с.

ЗАДАЧА НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Система управления имеет 21 настраиваемый параметр: 6 коэффициентов для трёх PI-контроллеров во внешнем контуре и 15 значений (3×5) коэффициентов матрицы усиления во внутреннем контуре. Начальные значения всех коэффициентов PI-контроллеров равны единице, а начальные значения коэффициентов матрицы усиления во внутреннем контуре – нулю. После запуска моделирования с этими значениями параметров наблюдается неустойчивое поведение ненастроенной системы (см. рис. 2).

Для стабилизации поведения системы и обеспечения всех требований необходимо настроить все параметры (21 значение). Эту задачу следует выполнять с помощью функции `systune` из пакета инструментов Robust Control Toolbox, которая позволяет совместно настроить внутренние и внешние контуры управления.

ПРОЦЕСС АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Функция `systune` настраивает систему управления, смоделированную в Simulink в соответствии с совокупностью требований, заданных одновременно во временной и частотной областях. Процесс настройки включает в себя четыре основных этапа:

1. Определение блоков модели Simulink, которые нужно настроить.
2. Определение требований.

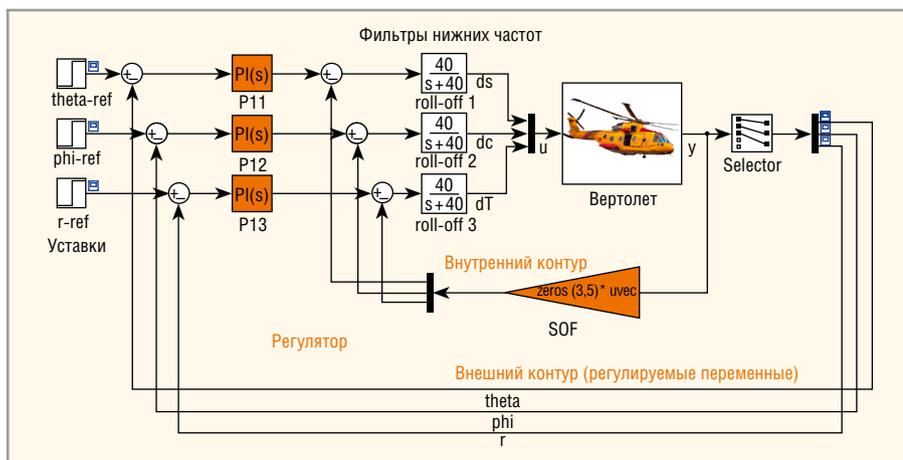


Рис. 1. Блок-схема системы управления полётом вертолёта, состоящей из внутреннего (синий) и внешнего (оранжевый) контура управления

3. Настройка параметров системы управления.
4. Обновление блоков Simulink с настроенными значениями параметров, и проверка результата настройки при моделировании.

Определение блоков для настройки

Используя интерфейс sITunable из пакета расширений Simulink Control Design, нужно указать название модели Simulink и имена блоков для настройки. sITunable автоматически линеаризует модель Simulink и устанавливает задание по настройке параметров для функции systune. Модель системы описывается следующим образом:

```
ST0 = sITuner('rct_helico',{'PI1', 'PI2', 'PI3', 'SOF'});
```

Определение требований

Пакет Robust Control Toolbox обеспечивает выполнение полного набора задач настройки, в том числе слежение за уставкой, подавление помех, формирование передаточной функции по частотной характеристике, задание запасов по фазе и амплитуде, а также размещение полюсов замкнутой системы. Для нашего примера мы используем следующие требования:

- отслеживание изменения уставки с заданным временем отклика не более двух секунд и установившейся ошибкой не более 1%:

```
TrackReq = TuningGoal.  
StepTracking({'theta-ref', 'phi-ref', 'r-ref'}, {'theta', 'phi', 'r'}, 2, 1e-2);
```

- обеспечение устойчивости системы при отклонении сигналов по амплитуде до 5 дБ и по фазе до 40° на входах и выходах объекта управления (независимо друг от друга или одновременно во всех каналах):

```
MarginReq1 = TuningGoal.  
Margins('u', 5, 40);  
MarginReq2 = TuningGoal.  
Margins('y', 5, 40);
```

- ограничение собственной частоты полюсов замкнутой системы до 20 рад/с:

```
PoleReq = TuningGoal.Poles();  
PoleReq.MaxFrequency=20;
```

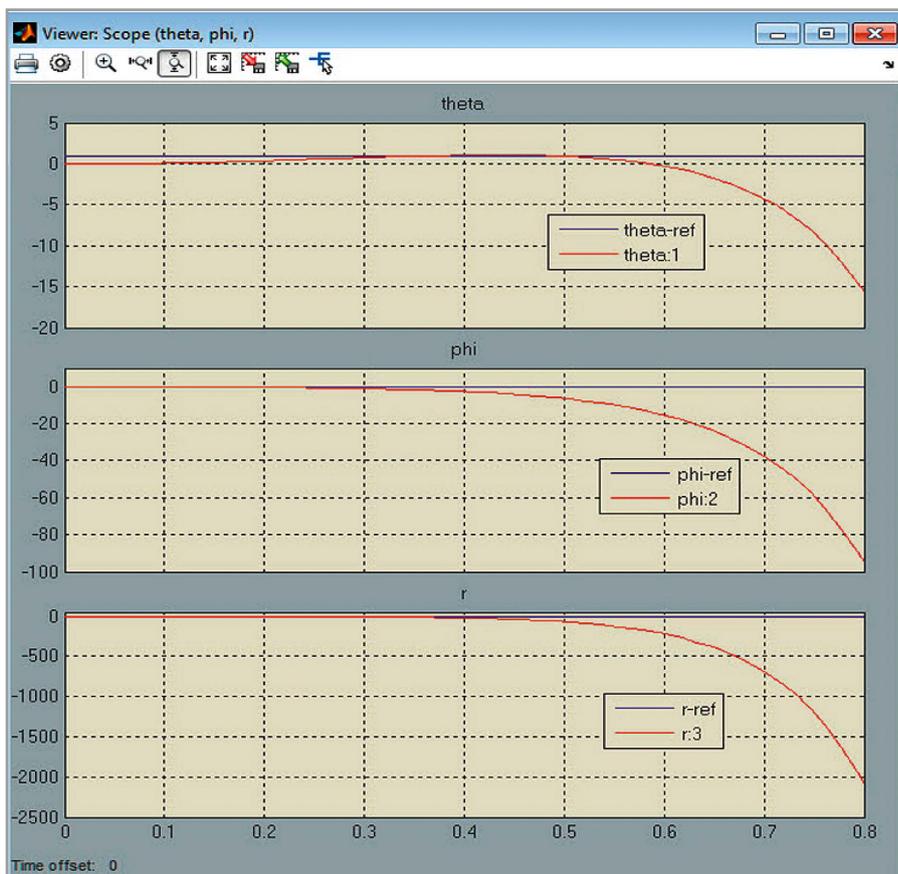


Рис. 2. Результаты моделирования показывают неустойчивое поведение системы (начальные параметры не настроены)

Настройка параметров системы управления

Теперь всё готово для использования функции systune для совместной настройки всех (21) параметров системы управления. Функция systune возвращает настроенную версию ST1 модели системы управления ST0:

```
AllReqs = [TrackReq, MarginReq1, MarginReq2, PoleReq];  
[ST1, fSoft, ~, Info] = systune(ST0, AllReqs);
```

Процесс оптимизации параметров занимает порядка трёх секунд. На рисунке 3 графики показывают, что настроенный контроллер практически полностью отвечает всем четырём требованиям.

Обновление и проверка модели

Запишем значения параметров, полученные в результате настройки системы, в модель Simulink:

```
writeBlockValue(ST1).
```

Результаты моделирования системы с новыми значениями параметров подтверждают, что контроллер обеспечи-

вает устойчивый отклик с надёжным отслеживанием уставки и эффективной развязкой (см. рис. 4).

Возможности настройки

Функция systune позволяет настраивать большинство блоков, используемых для создания системы управления в Simulink. К ним относятся усилитель, ПИД-регулятор, передаточная функция, модель в пространстве состояний, модель полюсов-нулей, дискретный фильтр и блоки LTI-систем. Можно настроить любую конфигурацию системы управления, содержащей эти блоки.

Изменяя требования к настраиваемым параметрам, можно найти оптимальное соотношение между производительностью и надёжностью системы. Можно также сравнить различные архитектуры управления и исследовать возможность уменьшения сложности конечного решения для системы управления. Например, путём установки коэффициента усиления блока SOF в ноль и перенастройки контуров PI-блоков при помощи команды systune можно проверить, является ли необходимым внутренний контур обратной связи. Сравнение результатов моделирования с исходной двухконтур-

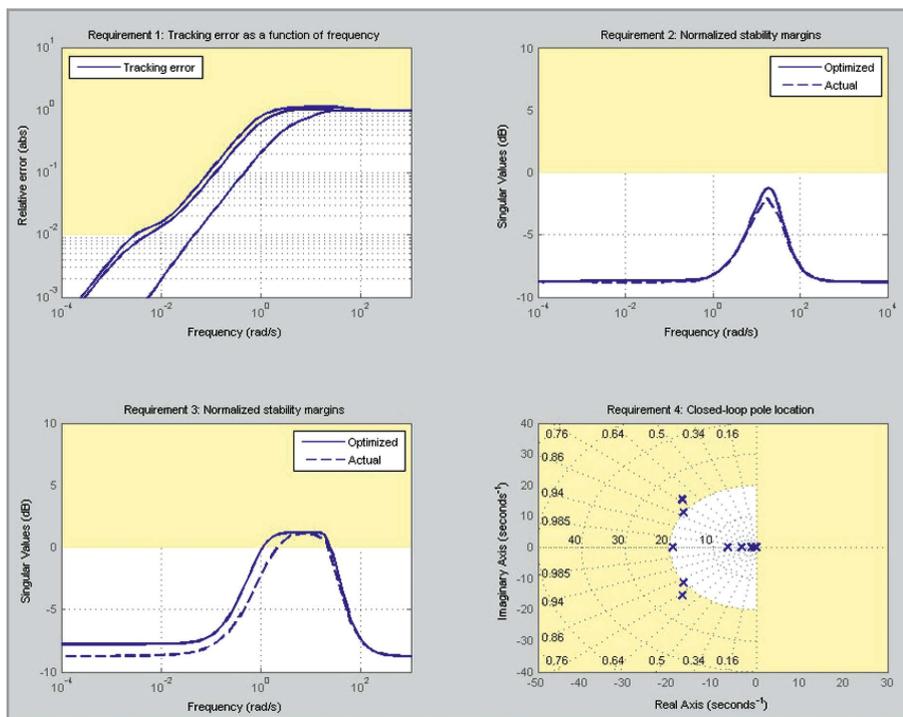


Рис. 3. Результаты проверки параметров системы управления на соответствие поставленным требованиям

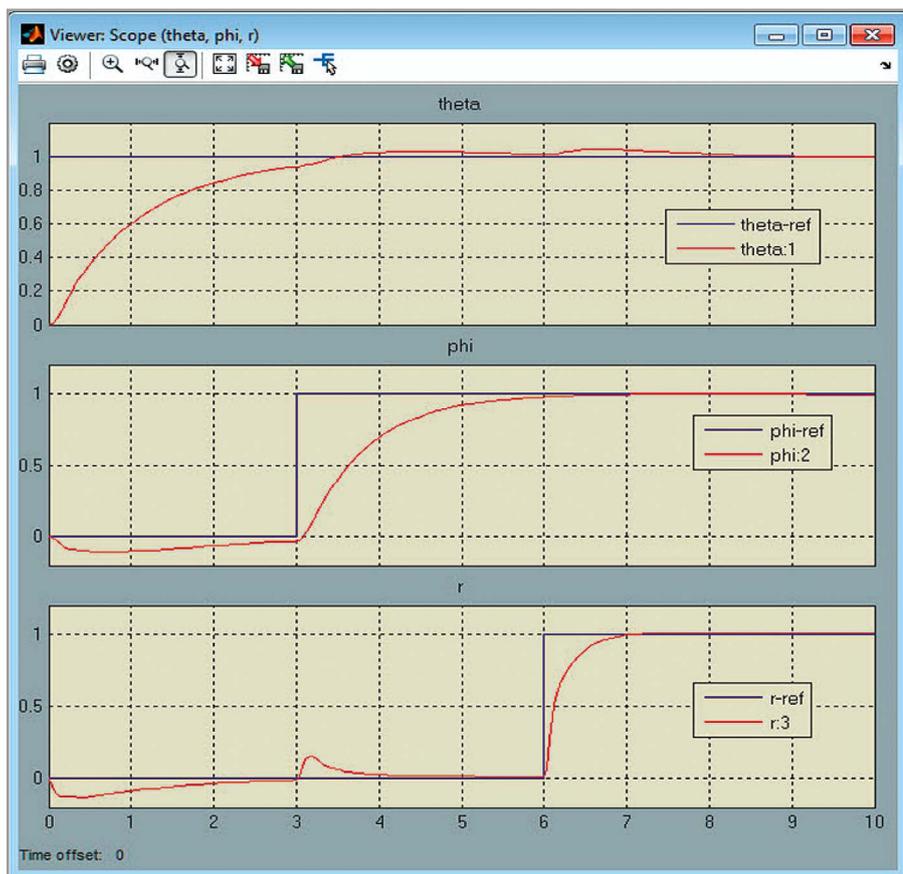


Рис. 4. Реакция системы с настроенными значениями параметров

ной архитектурой показывает, что внутренний контур важен для стабилизации системы и должен быть сохранён. Также можно применить команду *systune* для настройки системы управления по нескольким моделям объектов управления, которые отражают различ-

ные условия эксплуатации, номинальные и критичные рабочие режимы или естественное отклонение параметров системы. Например, систему управления полётом можно настроить в соответствии с минимальными требованиями по реакции и устойчивости не толь-

ко для нормально функционирующего летательного аппарата, но и для случаев возможных отказов каких-либо приводов и датчиков.

Хотя функция *systune* предназначена для настройки линейных систем управления, она также может быть использована для настройки контроллеров с управляемыми по заданной программе параметрами для нелинейных систем. Например, для системы управления полётом, параметры которой должны меняться в соответствии с величиной угла атаки и скорости самолёта, функция *systune* может настроить одновременно всю плоскость коэффициентов и сгенерировать гладкие и явные выражения для отображения зависимости коэффициента регулятора от заданных входных переменных (так называемое табличное управление).

Наконец, для инженеров, знакомых с методами проектирования на базе LQG и H-бесконечности, функция *systune* открывает две дополнительные возможности. Можно выполнить синтез системы управления на базе LQG или H-бесконечности с заданным порядком и фиксированной структурой, а также оптимизировать параметры системы управления с использованием совокупности требований методов проектирования на основе LQG (H-2) и H-бесконечности.

Функция *systune* использует современные методы негладкой оптимизации для настройки параметров системы управления [1, 2]. В отличие от «грубых» методов оптимизации, которые основаны на расширенной модели Simulink, *systune* формулирует и решает задачу настройки системы в частотной области. В результате функция *systune* позволяет выполнить настройку большинства систем за считанные секунды и с высоким качеством. Кроме того, как показывает пример системы управления полётом вертолёта, функция *systune* не требует хорошей начальной проработки решения. Настройка может быть начата на произвольном этапе, когда настраиваемые параметры ещё окончательно не установлены.

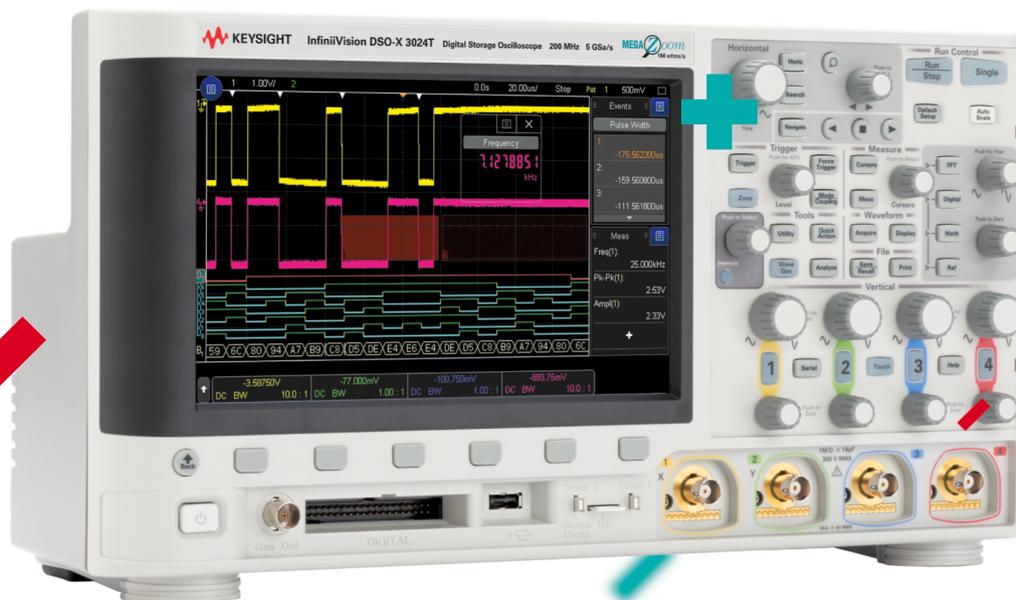
ЛИТЕРАТУРА

5. Apkarian P., Noll D. Nonsmooth H-infinity Synthesis. – IEEE Transactions on Automatic Control. 2006. 51. Pp. 71–86.
6. Apkarian P., Noll D. Nonsmooth Optimization for Multiband Frequency-Domain Control Design. Automatica. 2007. 43. Pp. 724–731.





ДИПОЛЬ



Новые осциллографы Keysight Technologies InfiniiVision 3000T серии X

Производительность старших серий осциллографов теперь доступна в сегменте среднего класса!

Революционная технология сенсорного запуска InfiniiScan Zone Trigger, емкостный сенсорный экран, специально разработанный пользовательский интерфейс, функциональность нескольких приборов в одном – и все это в сочетании с бескомпромиссной скоростью обновления более 1 млн. осциллограмм в секунду.

- Функциональность «6 приборов в 1»: осциллограф, частотомер, вольтметр, генератор, логический анализатор и анализатор протоколов
- Полоса пропускания до 1 ГГц
- Скорость обновления осциллограмм на экране – 1 млн. осцилл./с
- Аппаратное декодирование протоколов и тестирование по маске
- Расширенный математический анализ в базовой конфигурации, 38 автоматических измерений



Инновационные решения для электронной промышленности

Санкт-Петербург / Москва / Нижний Новгород
www.dipaul.ru / info@dipaul.ru