

# Методы машинного обучения в робототехнике

Эволюционные вычисления в синтезе регуляторов

Экстремальные системы

# Эволюционные вычисления в синтезе регуляторов



# Эволюционные алгоритмы

- **Эволюционные алгоритмы** — область знаний в сфере искусственного интеллекта, которое использует и моделирует процессы естественного отбора
- Являются адаптивными **поисковыми** методами
- Применяются базовые положения в теории биологической эволюции:
  - процессы отбора
  - процессы мутации
  - процессы воспроизводства

# Эволюционные алгоритмы

- **Популяция** - совокупность индивидуумов (агентов, особей)
- Эволюционирование популяции проходит согласно правилам отбора в соответствии с **целевой функцией** (окружающая среда)
- Каждому агенту популяции назначается значение его пригодности, т.е. целевой функции
- Размножаются только наиболее пригодные виды
- Рекомбинация и мутация позволяют изменяться агентам и приспособляться к среде

# Виды эволюционных алгоритмов

1. Генетические алгоритмы (ГА)
2. Генетическое программирование (автоматическое создание или изменение программ с помощью п.1) (ГП)
3. Эволюционное программирование (как и п.2, но изменяются только числовые значения, структура программы постоянна)
4. Программирование экспрессии генов
5. Эволюционные стратегии — похожи на генетические алгоритмы, но в следующее поколение передаются только положительные мутации
6. Дифференциальная эволюция
7. Нейроэволюция — аналогично генетическому программированию, но геномы представляют собой искусственные нейронные сети, в которых происходит эволюция весов при заданной топологии сети, или помимо эволюции весов также производится эволюция топологии;
8. Системы классификаторов

# Генетические алгоритмы

- **Генетический алгоритм**— эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе.
- Решаются оптимизационные задачи с использованием методов **естественной эволюции**, таких как:
  - наследование
  - мутация
  - отбор (селекция)
  - кроссовер (скрещивание, размножение, crossover )
- Поиск решений в **многомерных пространствах** (оптимальный brute force)

# Генетические алгоритмы

- Задача формализуется таким образом, чтобы её решение могло быть закодировано в виде вектора («**генотипа**») генов, где каждый ген может быть битом, числом или неким другим объектом
- Генотип не обязательно имеет фиксированную длину
- ГА служат, главным образом, для поиска решений в многомерных пространствах поиска
- Моделирование эволюционного процесса - изменение популяции в зависимости от функции приспособленности - повторяется **итеративно**

# Генетические алгоритмы

- **Остановка** эволюционных вычислений:
  - найдено оптимальное решение (глобальное, локальное)
  - достигнут предел по кол-ву поколений
  - достигнут предел по времени моделирования
- Ключевые **этапы**:
  - Задать целевую функцию (приспособленности) для индивидуумов популяции
  - Создать начальную популяцию
  - (Начало цикла)
  - Размножение (скрещивание)
  - Мутирование
  - Вычисление значение целевой функции для всех особей
  - Формирование нового поколения (селекция)
  - Если выполняются условия остановки, то (конец цикла),  
иначе (начало цикла)

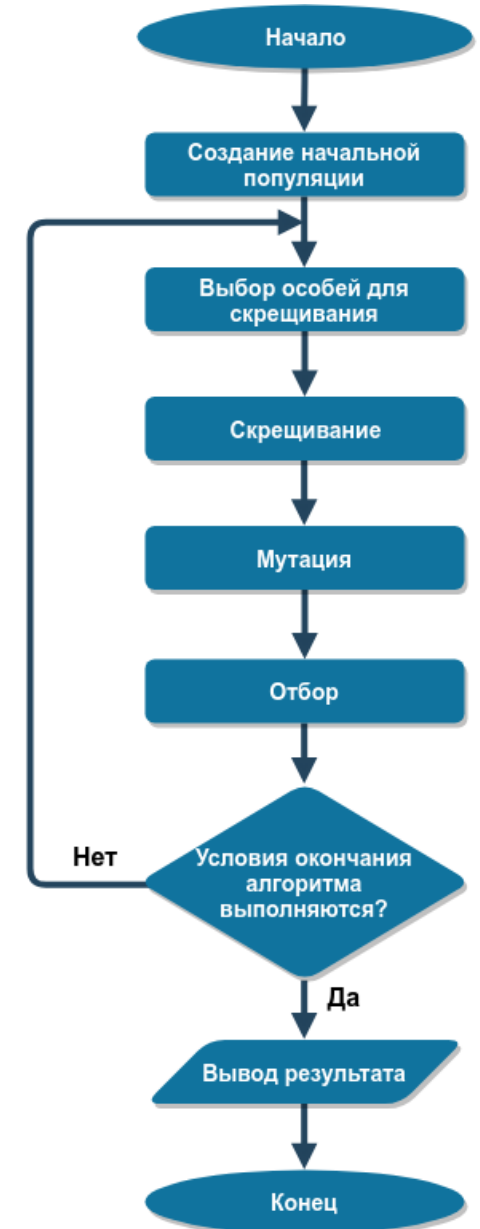


# Генетические алгоритмы

- **Элитарность** (необязательно): определенное количество наиболее подходящих индивидуумов с лучшими показателями переходят непосредственно к следующему поколению
- **Репликация**: индивидуум выбирается для перехода к следующему поколению
- **Кроссовер**: выбираются два индивидуума, которые обмениваются частью своего кода, а затем переходят к следующему поколению; кроссовер служит для использования и улучшения существующих успешных стратегий
- **Мутация**: индивидуум выбирается для того, чтобы часть его кода была изменена новыми значениями; мутация способствует разнообразию и служит для расширения исследования пространства параметров

# Генетические алгоритмы

- Для операций репликации, скрещивания и мутации агенты случайным образом выбираются для перехода к следующему поколению, причем вероятность отбора увеличивается с ростом приспособленности
- Пример скрещивания (кроссовер)

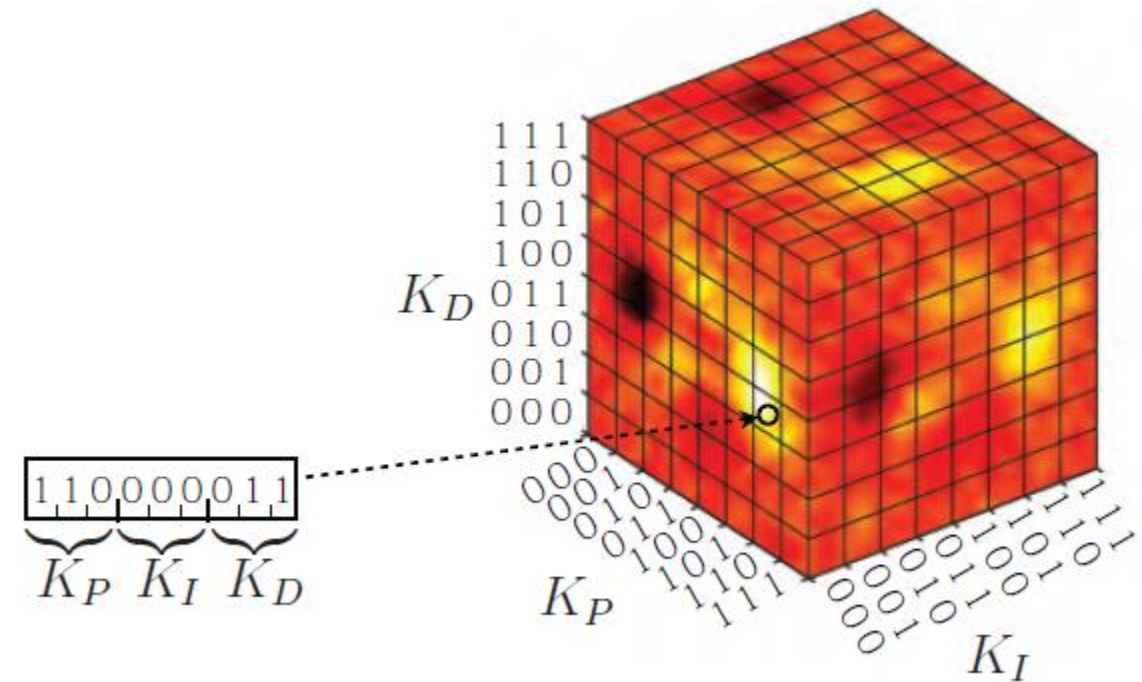


# Генетические алгоритмы

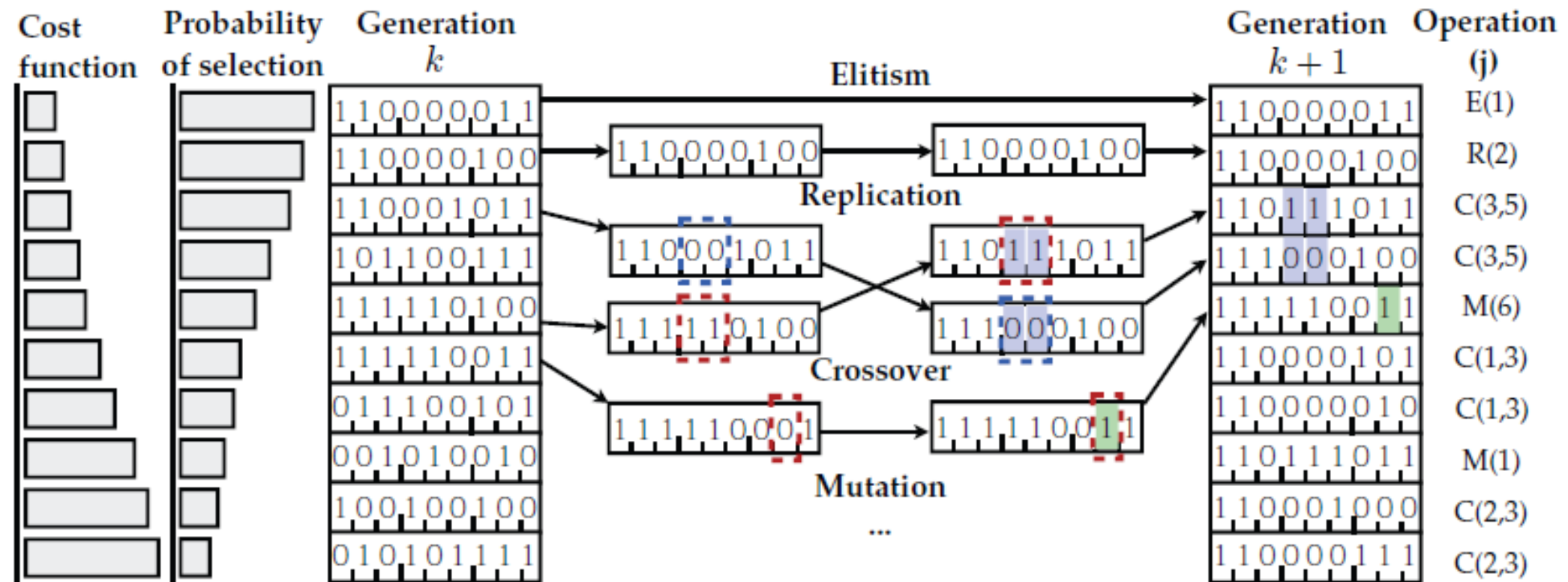
- «Среднее» между методом brute-force search и выпуклой (convex) оптимизацией
- Альтернатива дорогостоящей с точки зрения вычислительных мощностей выборке методом Монте-Карло, которая не масштабируется до многомерных пространств параметров
- **Методы Монте-Карло** — численные методы для изучения случайных процессов. Процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин, модель многократно обсчитывается, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики рассматриваемого процесса
- ГА **не гарантируют** сходимости к глобальному оптимальному решению
- **Гиперпараметры**, которые могут влиять на производительность ГА: **размер популяции, количество поколений, вероятности** отбора различных генетических операций
- Примеры применения на практике: смешение потоков, процессы горения, снижение лобового сопротивления

# Генетические алгоритмы

- Визуальный пример - настройка ПИД-регулятора
- ГА представляет заданное значение параметра как генетическую последовательность, которая объединяет различные параметры
- В примере параметры выражаются в двоичном представлении, которое масштабируется таким образом, что 000 является минимальной границей, а 111 — верхней границей



# Генетические алгоритмы

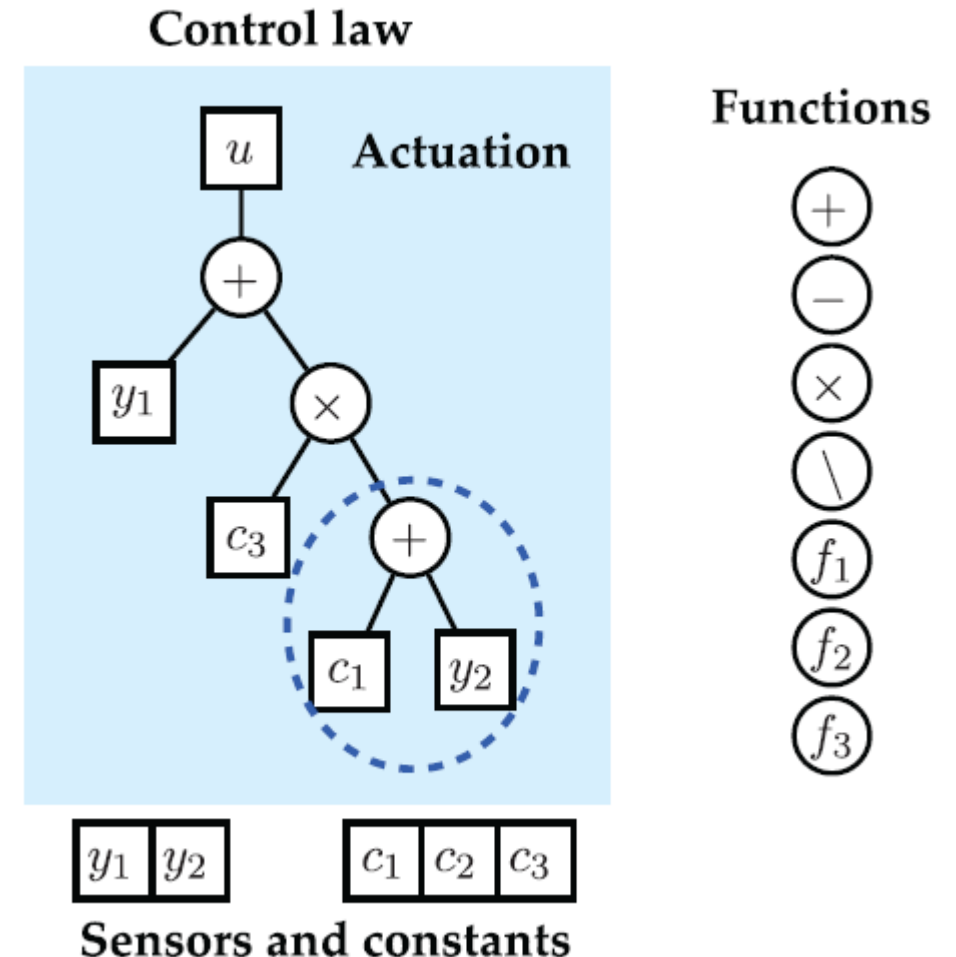


# Генетическое программирование

- Обобщение ГА, одновременно оптимизирующее как **структуру**, так и **параметры** карты ввода-вывода
- Может применяться для получения **законов управления**, которые отображают выходные данные датчиков на входные сигналы
- Представление **дерева функций** в ГП позволяет кодировать сложные функции сигнала датчиков у через рекурсивную древовидную структуру

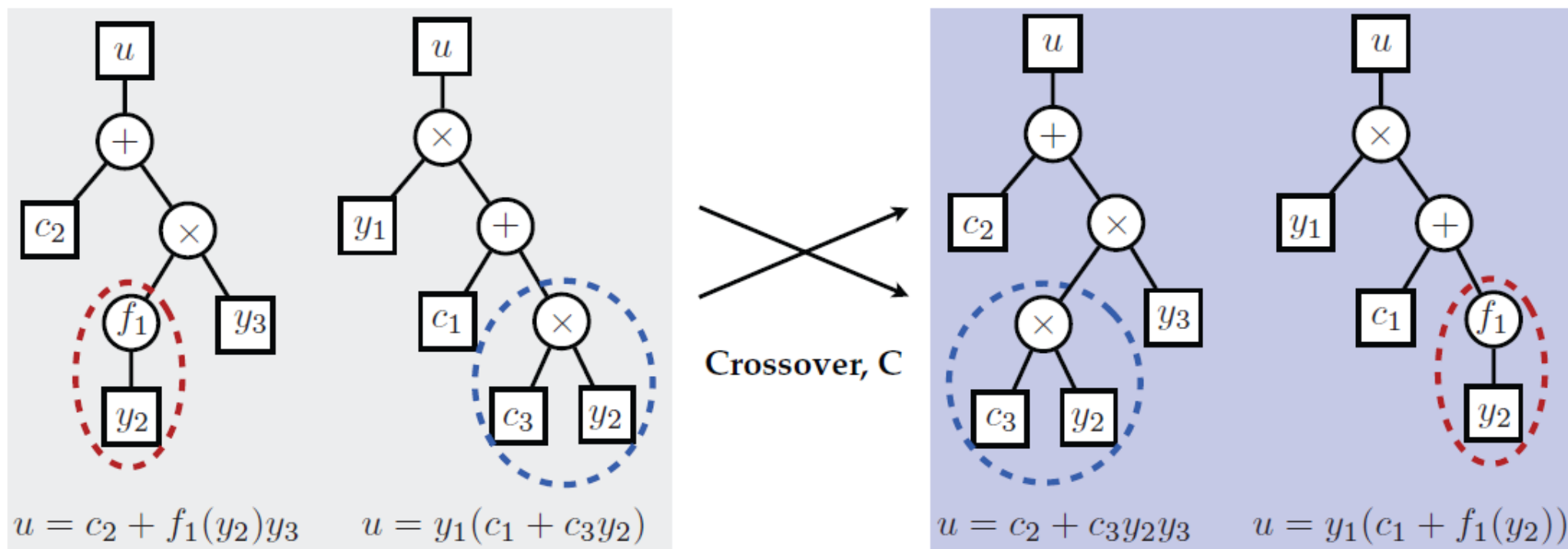
# Генетическое программирование

- Каждая ветвь — это сигнал, а точки слияния — математические операции
- Датчики и константы — это листья, а общий управляющий сигнал  $u$  — это корень
- Показан простейший пример, который может быть усложнен нелинейными функциями, запаздыванием, возмущениями, шумами и т.д.



# Генетическое программирование

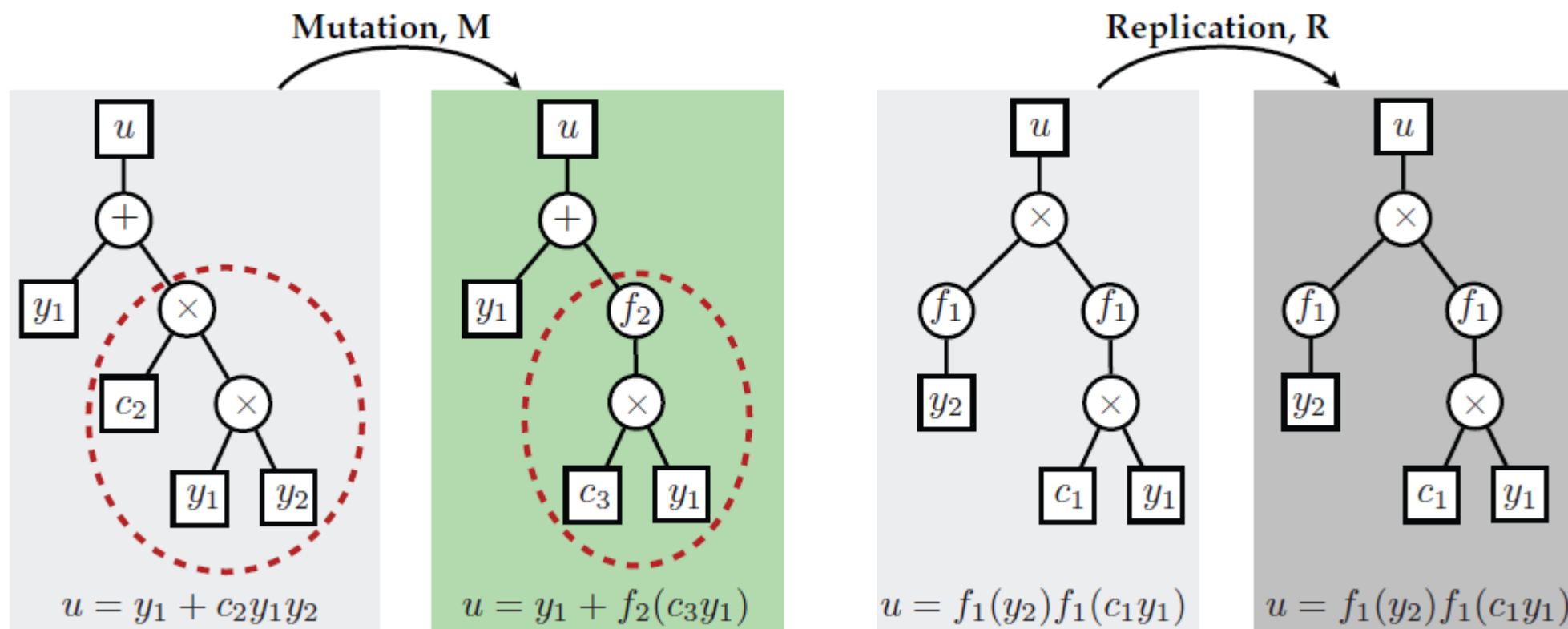
- Схематическая иллюстрация генетической операции кроссовера





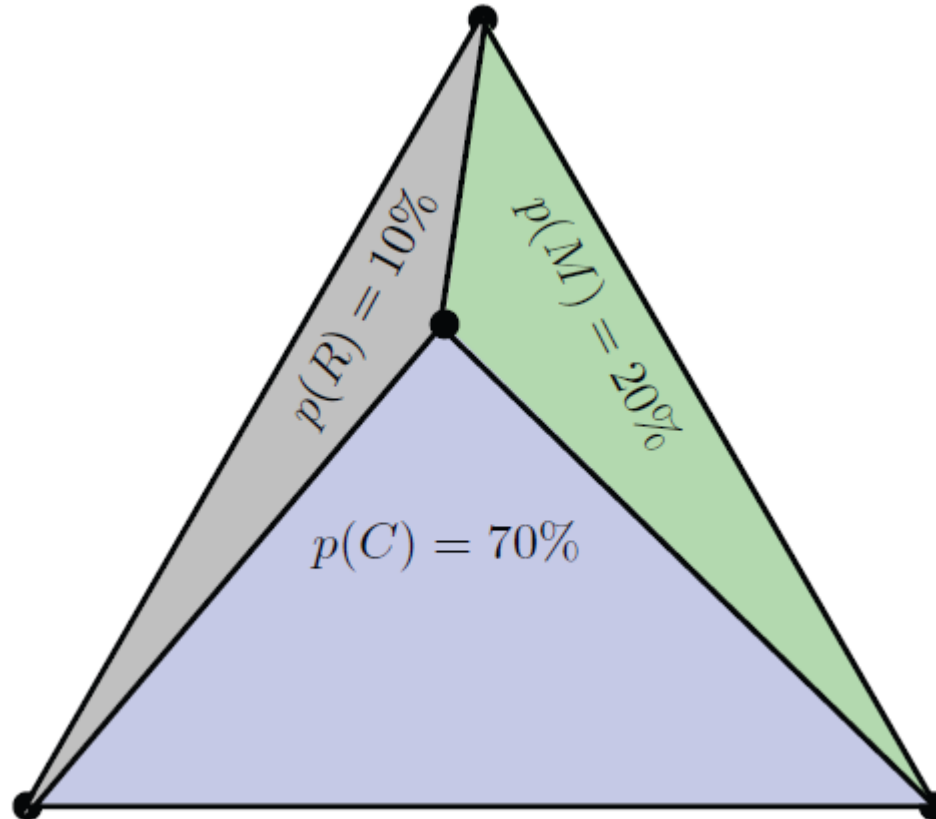
# Генетическое программирование

- Схематическая иллюстрация генетических операций мутации и репликации



# Генетическое программирование

- Настройка вероятностей для применения генетических операций кроссовера  $p(C)$ , мутации  $p(M)$  и репликации  $p(R)$



# Генетическое программирование

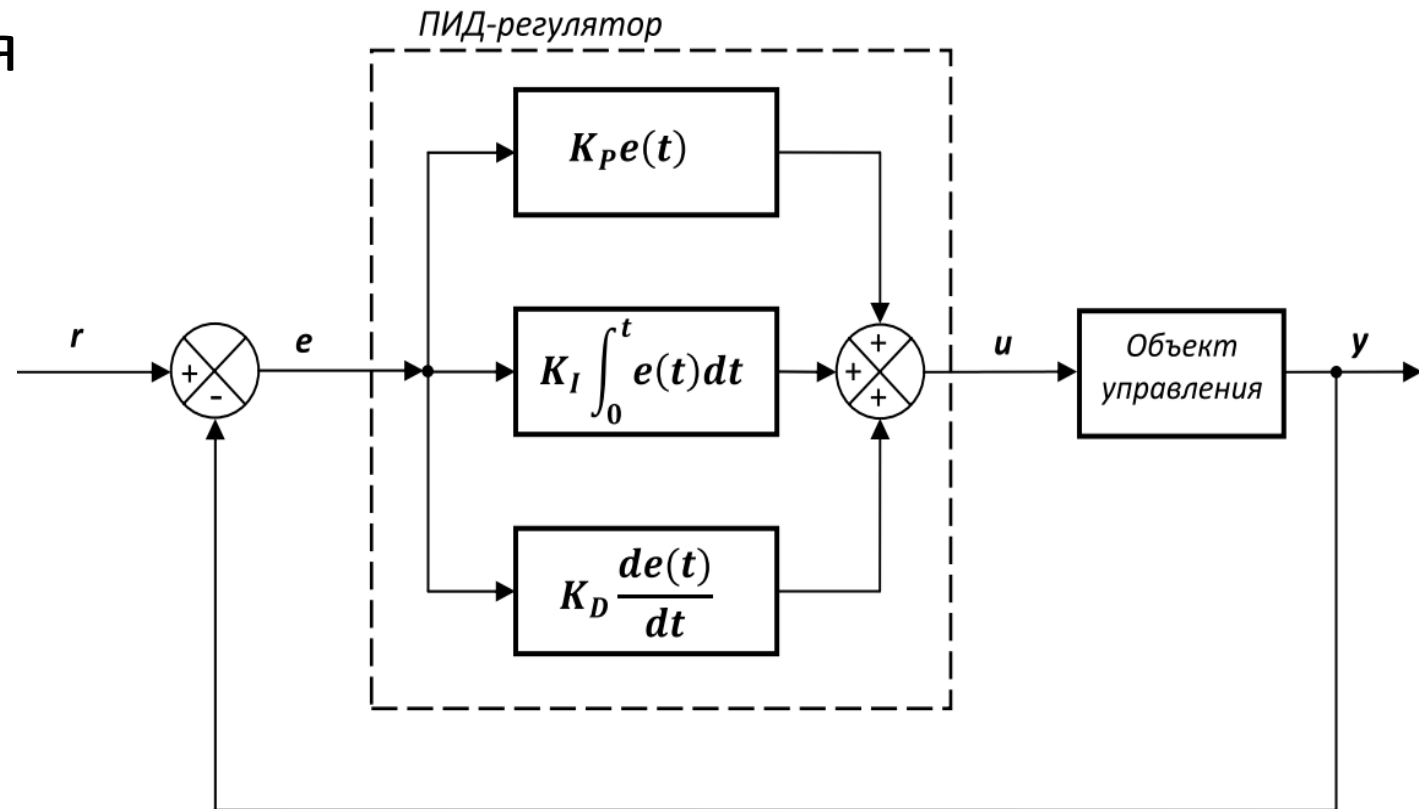
- Новая парадигма управления существенно нелинейными системами, где теперь можно идентифицировать структуру нелинейных законов управления
- Управление генетическим программированием особенно хорошо подходит для экспериментов, в которых можно быстро оценить заданный закон управления, что позволяет протестировать сотни или тысячи индивидуумов за короткий промежуток времени
- Применение в турбулентности привели к нескольким макроскопическим улучшениям - уменьшение сопротивления и улучшение перемешивания, в множестве конфигураций потока

# Пример

- Настройка ПИД-регулятора для системы  $G(s) = \frac{1}{s^4 + s}$ .
- Задающее воздействие 1
- Квадратичная целевая функция

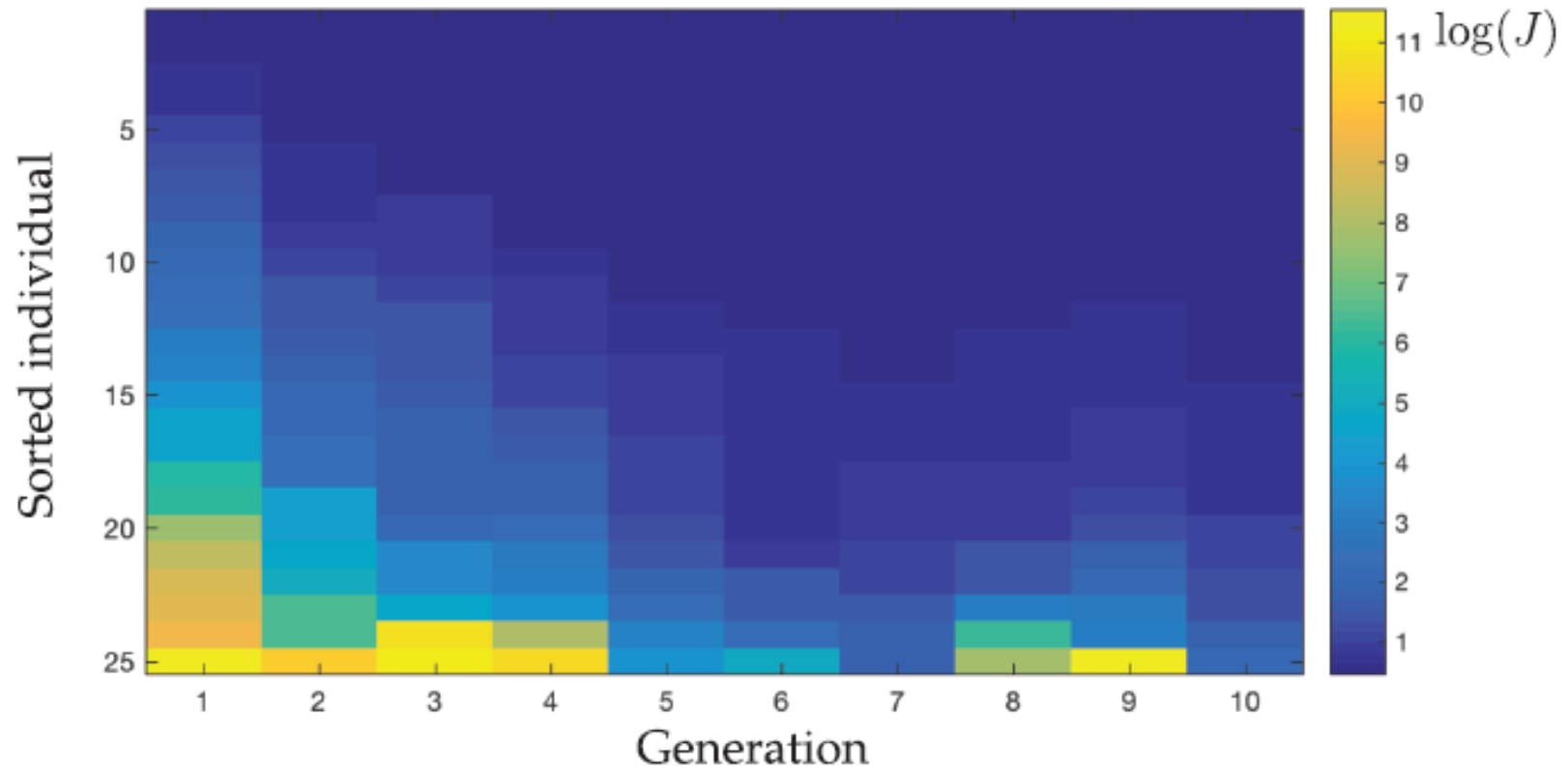
$$J = \int_0^T Q(w_r - y)^2 + Ru^2 d\tau$$

- $Q, R$  – весовые коэффициенты для ошибки и управления, соответственно



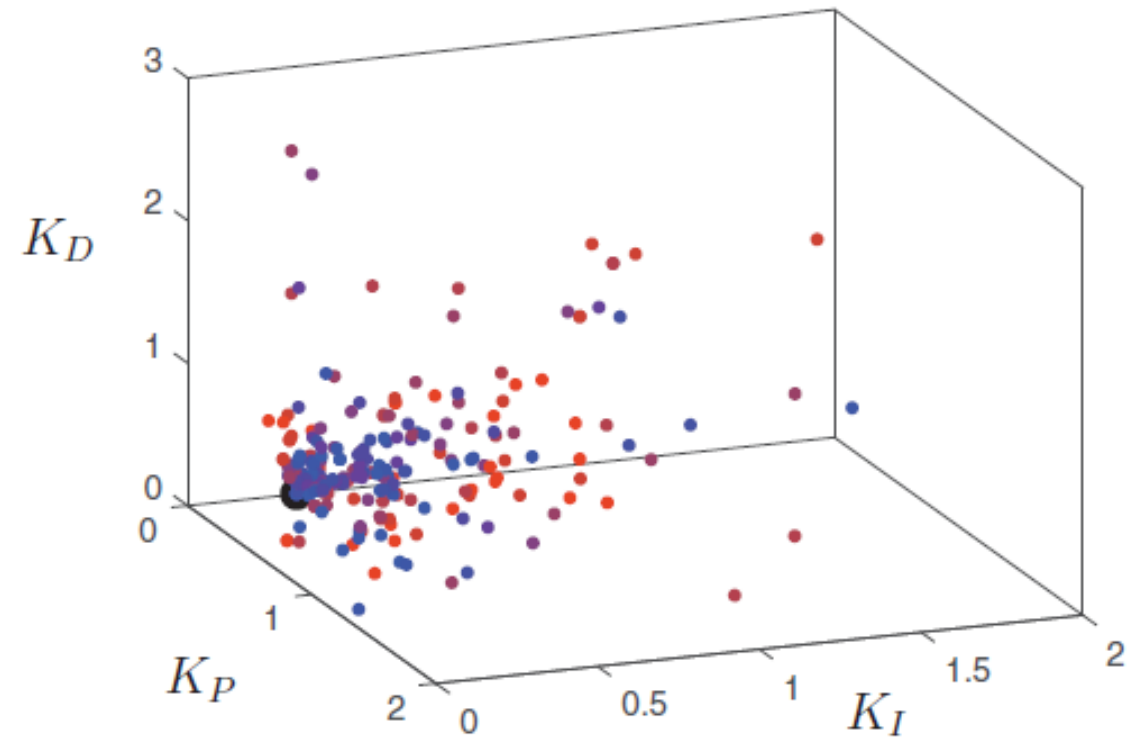
# Пример

- 25 индивидуумов в популяции и 10 поколений



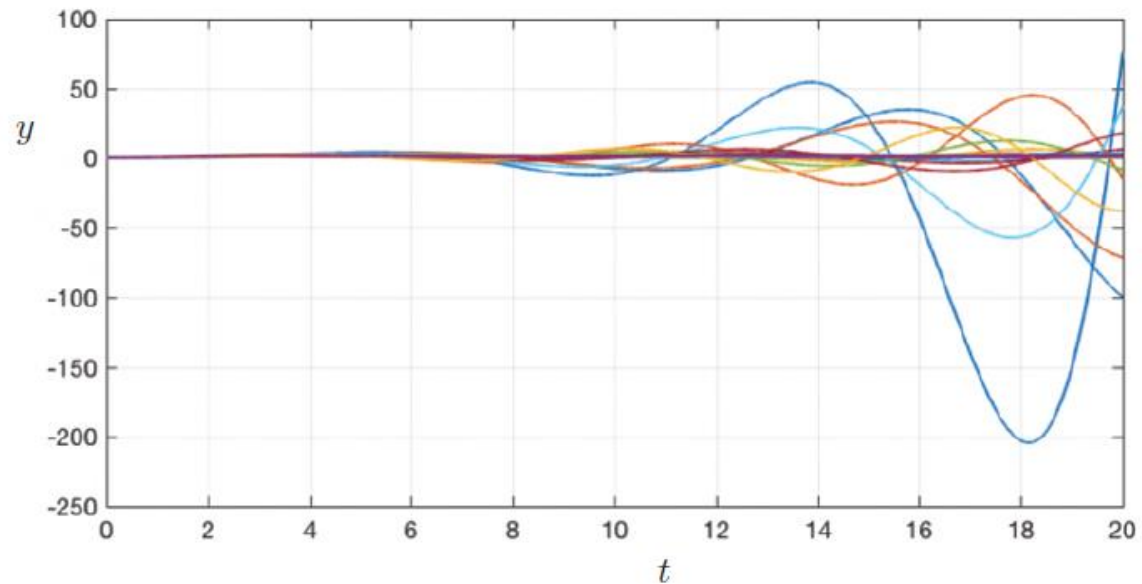
# Пример

- Красные точки соответствуют ранним поколениям
- Синие точки соответствуют более поздним поколениям
- Черная точка — лучший набор, найденный ГА

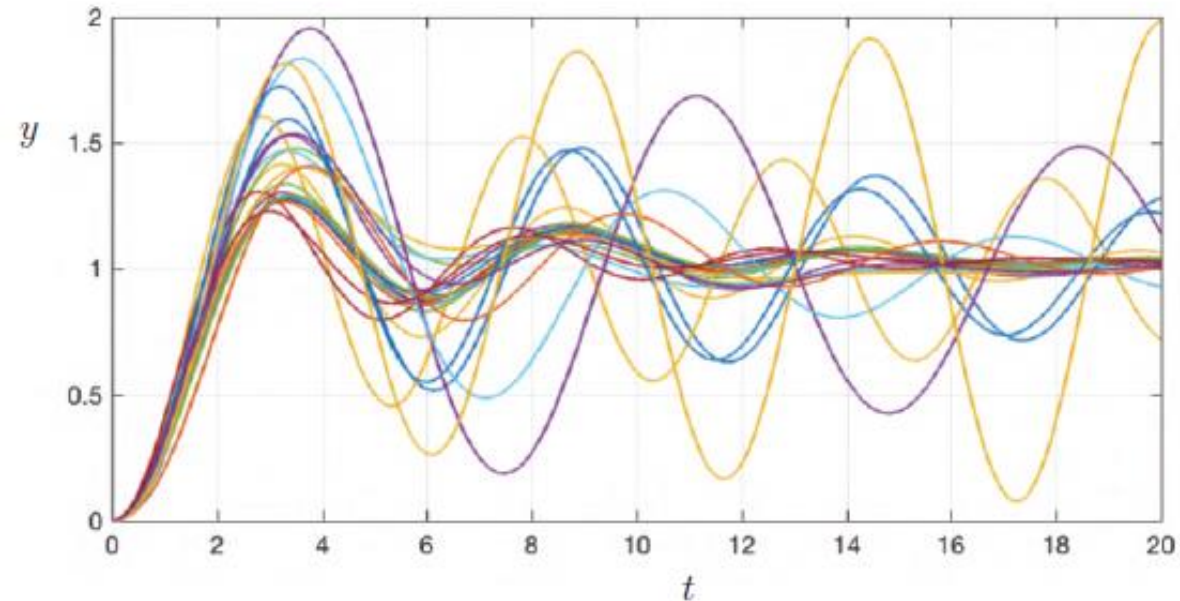


# Пример

Переходные процессы в **первом** поколении

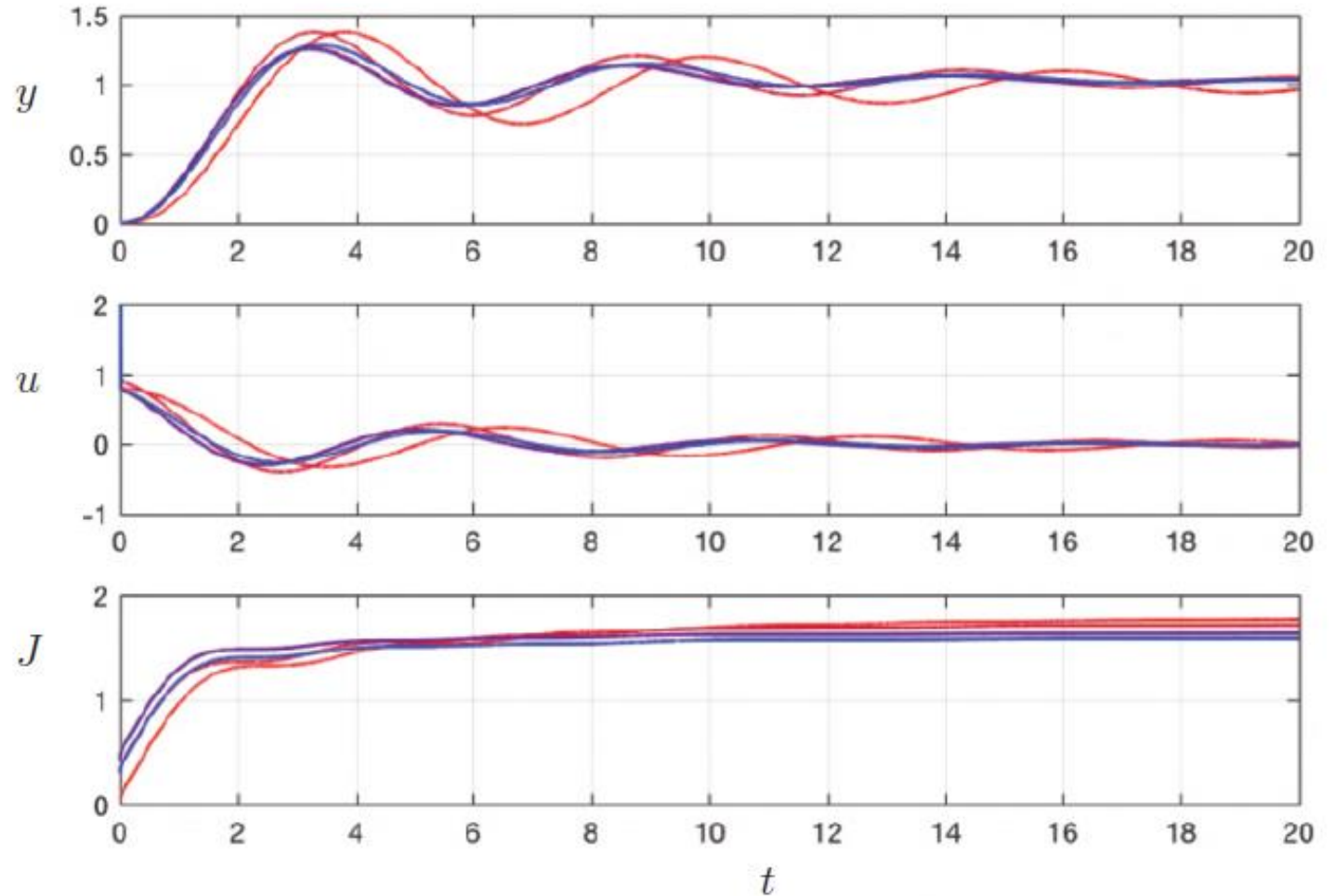


Переходные процессы в **последнем** поколении



# Пример

- Лучшие ПИД-регуляторы каждого поколения
- Красные траектории относятся к ранним поколениям
- Синие траектории соответствуют последним поколениям





# Экстремальные системы (Extremum-seeking controllers, ESC)

# Мотивация

- ESC – способ управления, не использующий модель объекта управления
- Недостатки **модельных** подходов:
  - может отсутствовать доступ к модели или модель может быть непригодна для управления (сильные нелинейности или описание модели в неподходящей форме)
  - управление может сделать известную модель недействительной, что приведет к появлению новой, неучтенной динамики
  - в системе могут происходить медленные изменения, которые изменяют основную динамику, эти эффекты трудно измерить и смоделировать

# Мотивация

- **Экстремальные системы** являются особенно привлекательной формой адаптивного управления для сложных систем, поскольку они не полагаются на базовую модель и гарантируют сходимость и устойчивость при наборе четко определенных условий
- Поиск экстремума можно использовать для отслеживания локальных максимумов целевой функции, несмотря на возмущения, изменяющиеся параметры системы и нелинейности
- Адаптивное управление может быть реализовано для своевременного управления или использоваться для медленной настройки параметров в работающем контроллере

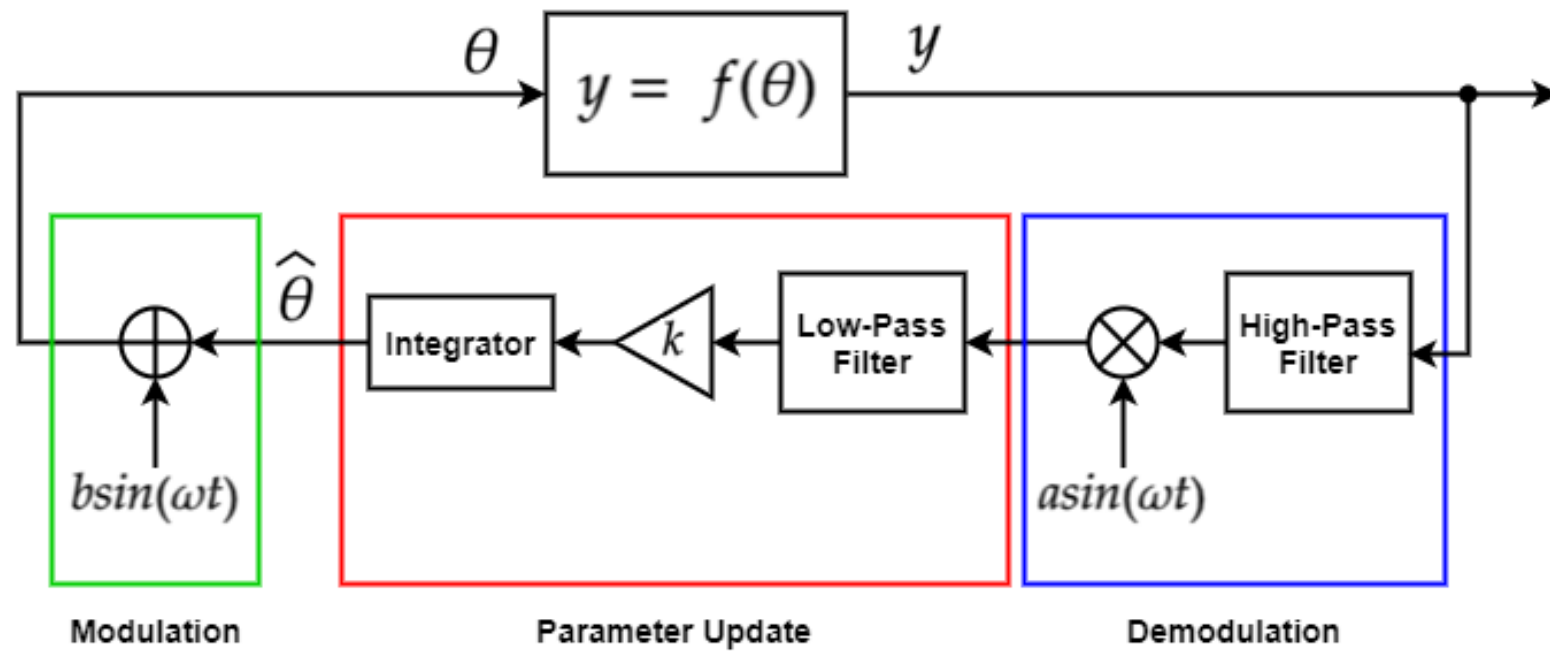
# Экстремальные системы

- ESC можно рассматривать как усовершенствованный метод возмущения и наблюдения
- В сигнал управления дополнительно вводится **синусоидальное возмущение**, что используется для оценки **градиента** целевой функции  $J$ , который должен быть максимизирован или сведен к минимуму
- Целевая функция обычно вычисляется на основе измерений системы с помощью датчиков, в конечном итоге она зависит от внутренней динамики и выбора входного сигнала

# Примеры применения на практике

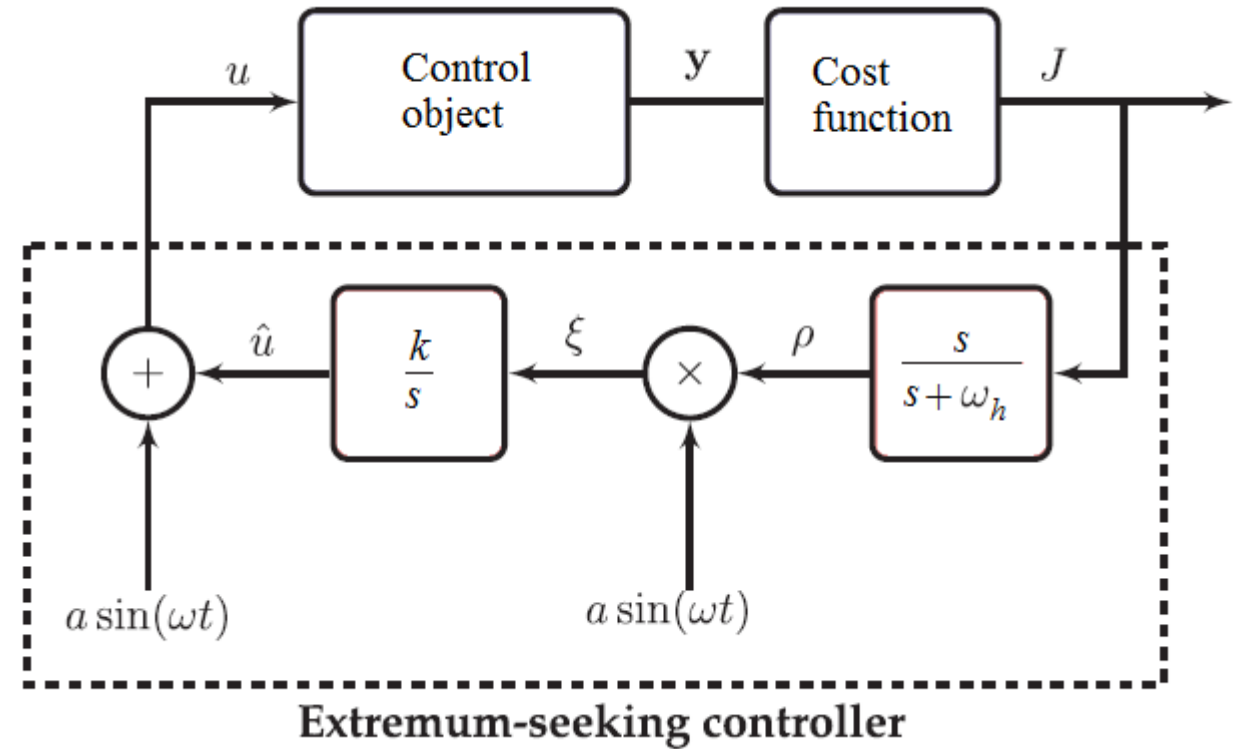
- Широкое применение для ряда сложных систем ввиду отсутствия предположений о системе и простоты реализации
- Алгоритмы отслеживания максимальной мощности в фотогальванике и преобразовании энергии ветра
- В фотовольтаике в качестве сигнала возмущения используется пульсация напряжения или тока в силовых преобразователях
- В задачах преобразования ветровой энергии в качестве возмущения используется «турбулентность»
- Атмосферные турбулентные колебания могут использоваться в качестве сигнала возмущения для оптимизации управления самолетом
- Другие примеры: формирование лазерного импульса, настройка волоконных лазеров с высоким коэффициентом усиления

# Схема ESC



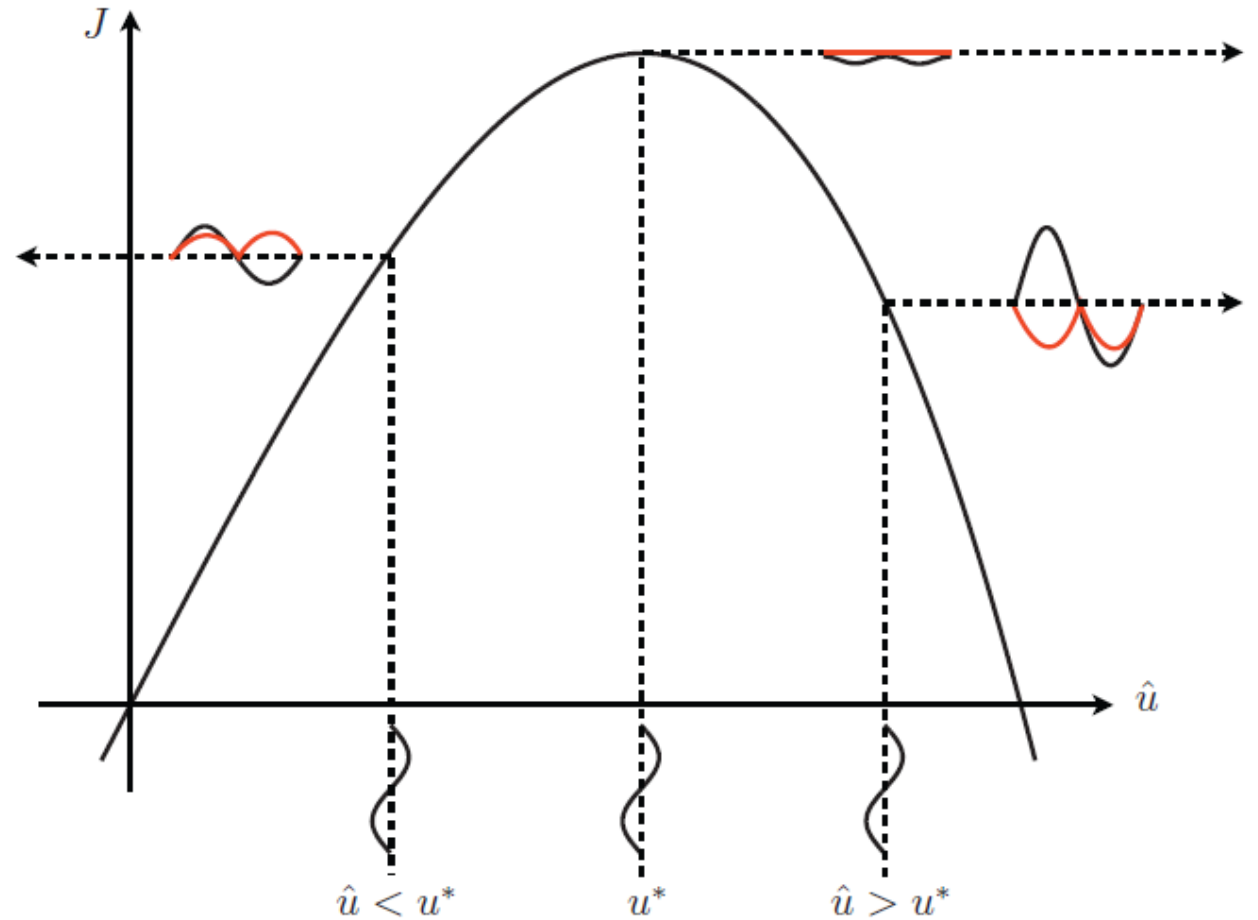
# Упрощенная схема

- Скалярное управление  $u$
- Выпуклая целевая функция  $J(u)$
- Фильтр верхних частот приводит к возмущению на выходе с нулевым средним значением  $\rho$ , который затем умножается (демодулируется) на то же входное возмущение, приводящее к сигналу  $\xi$



# Оптимизация

- Для упрощения рассмотрим статический объект управления (например,  $y = u$ ) с выпуклой целевой функцией  $J(u)$
- Входное возмущение используется, чтобы оценить градиент целевой функции  $J$  и направить сигнал управления  $u$  к оптимизирующему значению  $u^*$





# Экстремальные системы

- Для управления важны три различных временных масштаба:
- 1. медленный – внешние возмущения и изменение параметров
- 2. средний – частота возмущения  $\omega$
- 3. быстрый – системная динамика
- К оценке входа добавляется синусоидальное возмущение, которое максимизирует целевую функцию

$$u = \hat{u} + a \sin(\omega t)$$

- Это входное возмущение проходит через динамику системы и выход, в результате чего целевая функция  $J$  изменяется синусоидально около некоторого среднего значения

# Экстремальные системы

- Целевая функция  $J$  преобразуется с помощью фильтрации верхних частот для исключения среднего (постоянная составляющая), в результате чего получается сигнал  $p$
- Простой вариант фильтра верхних частот

$$\frac{s}{s + \omega_h}$$

- Фильтр верхних частот выбирается таким образом, чтобы пропускать частоту возмущения  $\omega$

# Экстремальные системы

- Сигнал  $\rho$  с фильтра верхних частот, умножается на входную синусоиду, которая также может иметь фазовый сдвиг  $\phi$ . В результате получается демодулированный сигнал  $\xi$

$$\xi = a \sin(\omega t - \phi) \rho$$

- Сигнал  $\xi \geq 0$ , если вход  $u$  находится слева от оптимального значения  $u^*$ , и  $\xi \leq 0$  если  $u$  находится справа от оптимального значения  $u^*$ .

# Экстремальные системы

- Интегрируя демодулированный сигнал  $\xi$  получаем оценку управления  $\hat{u}$ , изменяющуюся в направлении к оптимальному управляющему воздействию  $u^*$

$$\frac{d}{dt}\hat{u} = k \xi$$

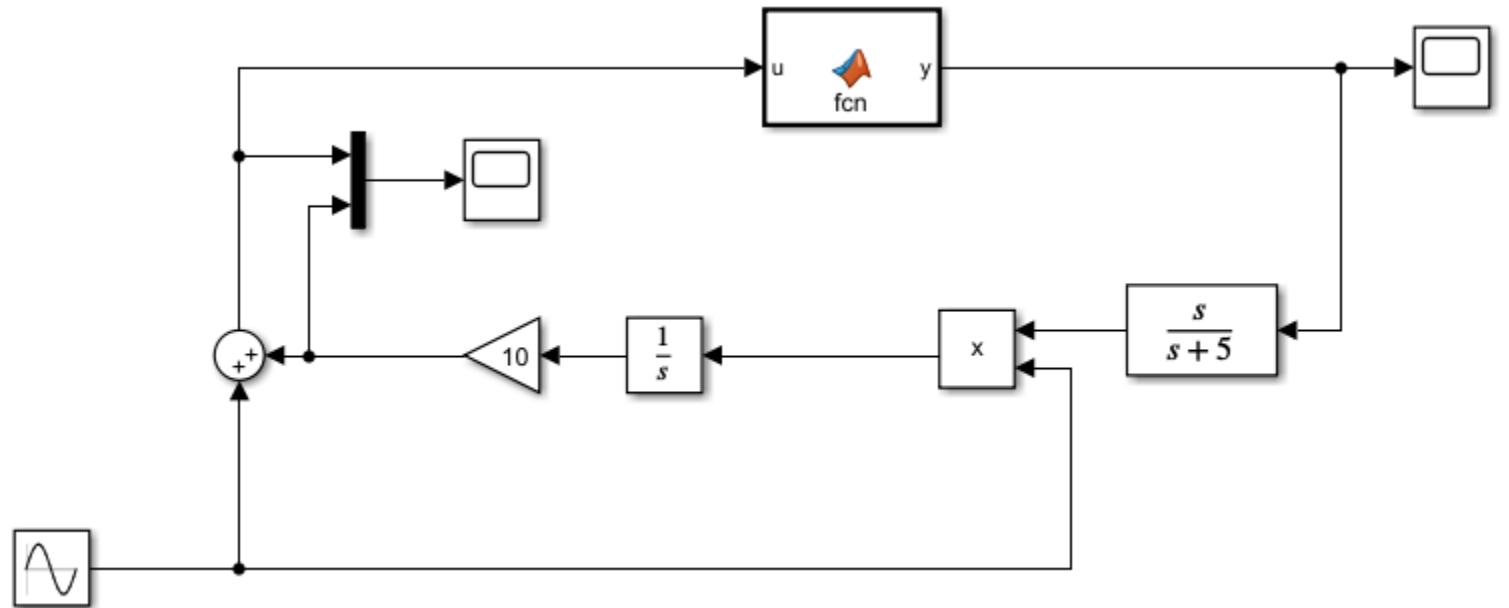
- Коэффициент настройки  $k$  определяет скорость изменения оценки управления  $\hat{u}$  по градиенту  $J$ .

# Простой пример

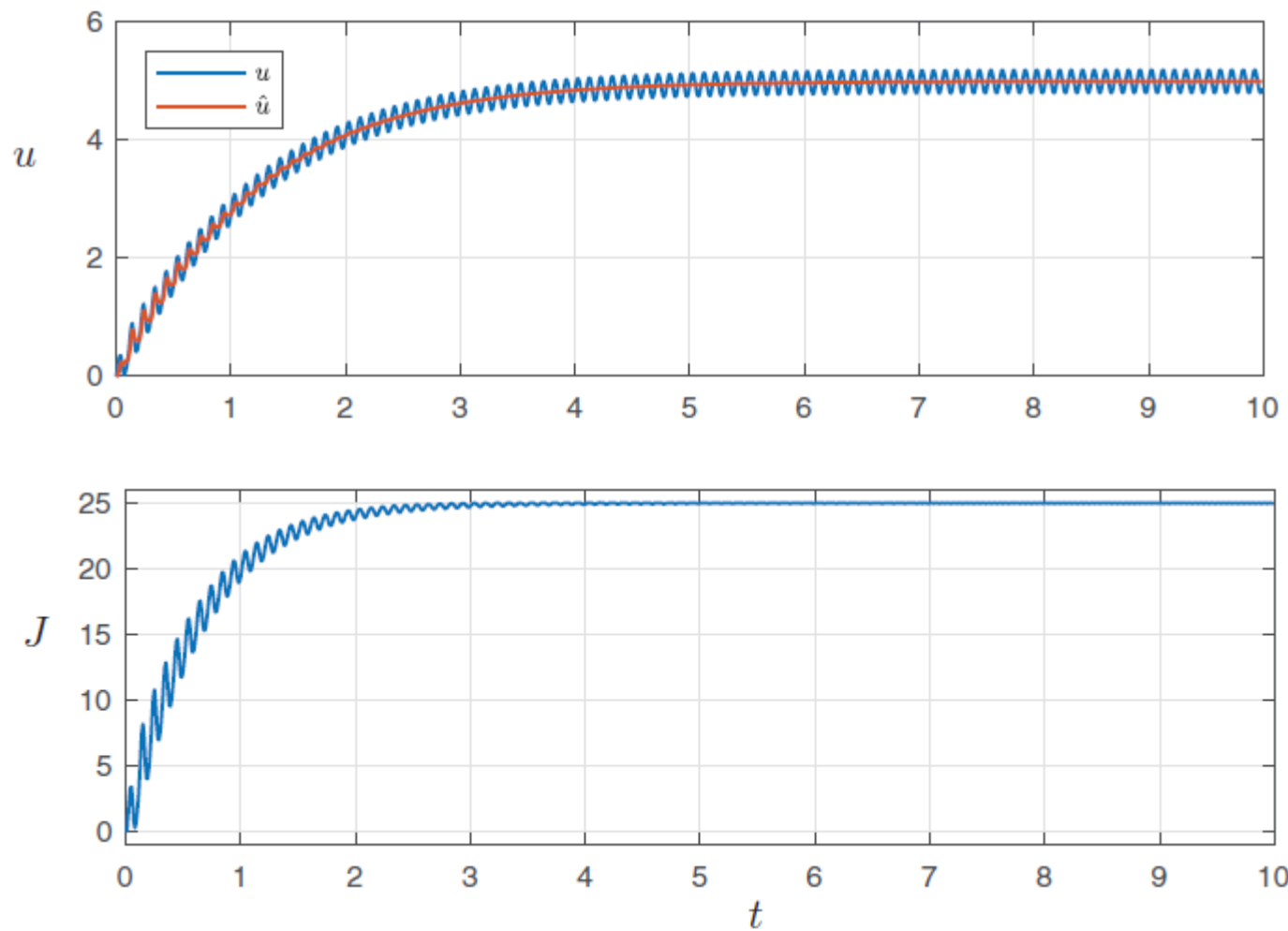
$$J(u) = 25 - (5 - u)^2$$

$$\omega = 10 \text{ Hz} \quad a = 0.2$$

$$u^* = 5$$

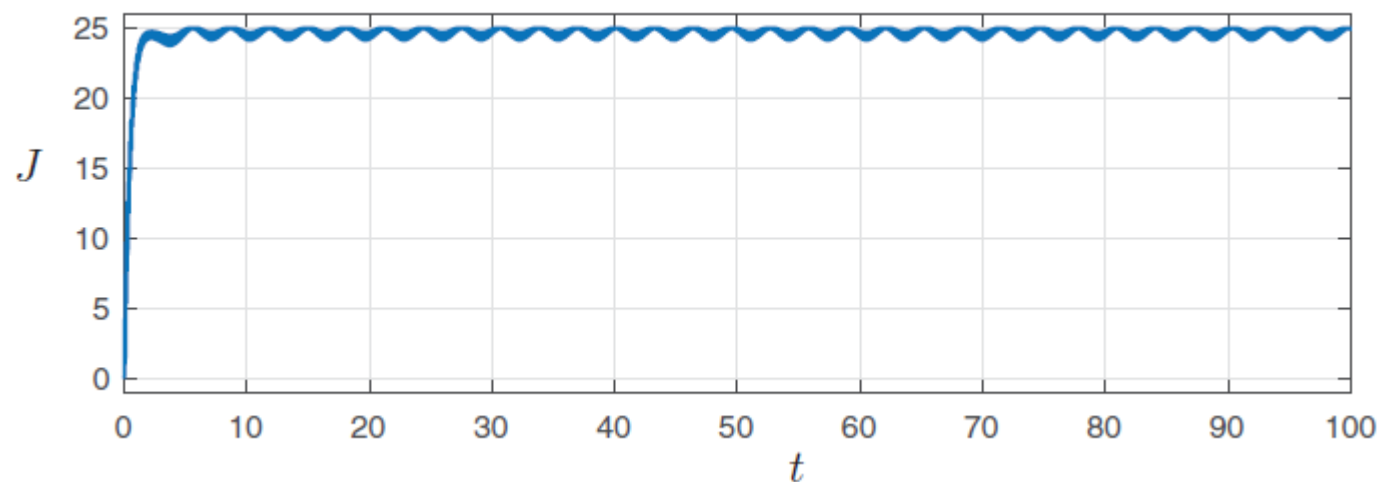
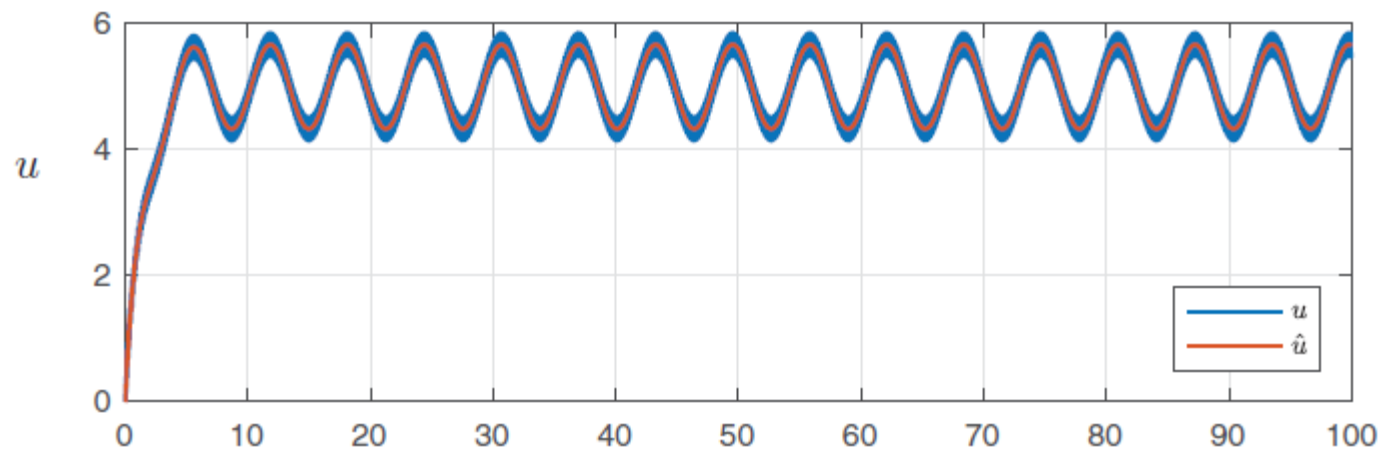


# Простой пример



# Простой пример

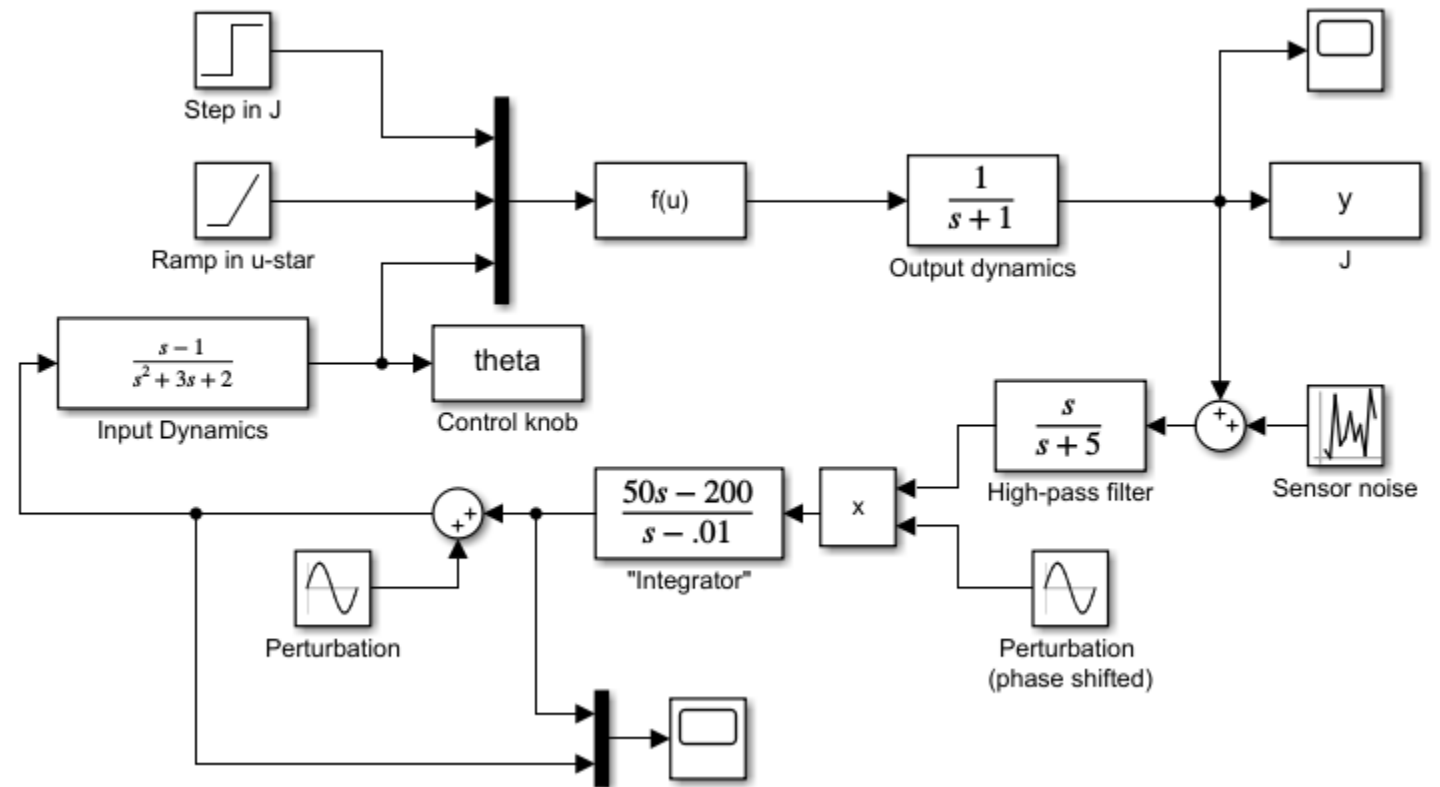
$$J(u) = 25 - (5 - u - \sin(t))^2$$



# Пример со сложной системой

$$J(\theta) = .05\delta(t - 10) + (\theta - \theta^*(t))^2$$

$$\theta^* = .01 + .001t$$





# Пример со сложной системой

