## Иерархическое управление нелинейными системами

Управление энергетическими установками требует одновременно поддерживать заданные параметры, учитывать ограничения оборудования и быстро реагировать на изменения режима. Особенно сложна эта задача для нелинейных систем: их поведение может существенно меняться при переходе от одной рабочей точки к другой, а вычислительно затратный поиск оптимального управления способен замедлить реакцию системы.

Исследователи Высшей школы управления кибер-физическими системами СПбПУ профессор *Вячеслав Шкодырев* и доцент *Хохловский Владимир* предложили иерархический подход к управлению такими системами. Он сочетает многоцелевую оптимизацию на верхнем уровне с быстрым контуром управления на нижнем. Метод не требует предварительно линеаризовать модель вблизи одной рабочей точки, что позволяет учитывать нелинейную динамику системы в более широком диапазоне режимов.

Подход включает три взаимосвязанных этапа. Первый заранее оценивает состояние системы к моменту, когда завершится поиск нового управления. Второй с помощью генетического алгоритма формирует набор возможных управляющих политик и выбирает решения,

отражающие компромисс между несколькими целями. Третий, низкоуровневый контур применяет выбранную политику и одновременно контролирует допустимые значения управляющих воздействий и скорость их изменения.

Для поиска компромиссных решений авторы используют Парето-оптимизацию. Она позволяет не сводить несколько целей к одному показателю, а сформировать набор вариантов, каждый из которых по-своему балансирует требования системы. Затем из этого набора выбирается траектория, наиболее подходящая текущему состоянию объекта и заданным целям управления.

Метод проверили в компьютерной симуляции барабанного котлоагрегата мощностью 160 МВт. Модель описывает давление пара, электрическую мощность и уровень воды в барабане, а управляющими воздействиями служат положения клапанов, регулирующих подачу топлива, пара и питательной воды. В одном из экспериментов заданные параметры системы менялись последовательно, а алгоритм должен был перевести объект между рабочими режимами, соблюдая ограничения на величину и скорость изменения управляющих сигналов.

Авторы продемонстрировали, что предложенная схема сохраняет управление без остановки основного контура, даже когда генетическому алгоритму требуется дополнительное время для поиска политики. В симуляции период дискретизации составлял 0,1 секунды, а задержка поиска проверялась в вариантах 0,3 и 0,7 секунды. По данным статьи, система смогла удерживать заданные выходы и ограничения в обоих случаях.

В сравнительном эксперименте на модели котлоагрегата предложенный метод показал меньшее время сходимости, чем рассмотренные в статье методы интегрального обучения с подкреплением и модельно-предиктивного управления. Для трех показателей — давления в барабане, уровня воды и мощности — время составило соответственно 150, 55 и 85 секунд. Эти результаты относятся к компьютерной модели и выбранному сценарию изменения нагрузки, поэтому не подтверждают эффективность метода на реальной электростанции.

*Оригинал статьи: “Hierarchical Multi-objective Control of Nonlinear Systems with Dynamical Input Constraints”, Artificial Intelligence and Applications, 2026, Vol. 4, No. 1, pp. 57–67.*