

**УДК 62-52**

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИМИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

*А. С. Куценко, д.т.н., профессор  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
kuzenko@kpi.kharkov.ua*

*Рассмотрены квазистатические термодинамические процессы с точки зрения теории управления. На основе принципа максимума получены оптимальные термодинамические циклы для различных внешних условий.*

*Kutsenko A.S. Optimal control of quasi-static thermodynamic processes. Quasi-static thermodynamic processes in terms of control theory are considered. Optimal thermodynamic cycles for different external conditions are obtained based on the maximum principle.*

*Ключевые слова:* КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ.

*Keywords:* QUASISTATIC PROCESSES, OPTIMAL CONTROL.

Теория оптимального управления нашла множество приложений при решении задач управления, прежде всего, механическими и электромеханическими системами. На основе принципа максимума решен ряд практических задач управления космическими летательными аппаратами. Широкое применение принцип максимума нашел при решении задач оптимального управления электроприводом в различных технологических системах. В то же время первой решенной и практически реализованной задачей оптимального управления была задача об организации термодинамического цикла с максимальным коэффициентом полезного действия, решенная С. Карно и Р. Клаузиусом. Постановка задачи о наиболее экономичном

термодинамическом цикле содержала все компоненты, обусловленные современной теорией управления: математическую модель в виде множества моделей элементарных процессов, цель управления – замкнутый цикл в фазовом пространстве, ограничения в виде максимальной и минимальной температур, критерий качества – термический КПД.

Целью данной работы является попытка получения ключевых положений равновесной термодинамики на основании достижений современной теории управления и обобщение результатов на случай произвольных многомерных квазистатических процессов, имеющих место в различных энерго-технологических системах.

Можно показать, что квазистатическим процессам, которыми оперирует равновесная термодинамика, соответствует математическая модель в виде системы аффинных дифференциальных уравнений, линейных и однородных по управлениям. При этом величина каждой компоненты вектора управлений имеет смысл интенсивности некоторого воздействия на термодинамическую систему, а соответствующая ему вектор-функция задает геометрическую структуру траекторий, порождаемых этим воздействием.

Показано, что для любой, наперед заданной функции состояния  $U(x)$  (энергии), можно единственным образом построить ортогональную систему функционалов (работ), сумма которых равна приращению  $U(x)$  на концах произвольной фазовой траектории, полученной в результате некоторого векторного управляющего воздействия. Полученный результат можно рассматривать в качестве обобщения первого начала термодинамики.

С позиций теории управления проанализировано второе начало термодинамики в аксиоматической формулировке Каратеодори. Показано, что существование интегрирующего множителя дифференциальной формы для термического воздействия, является частным случаем неуправляемости аффинной управляемой системы с количеством управлений меньшим размерности фазового пространства. Обоснован

критерий управляемости квазистатических систем, основанный на оценке размерности замкнутой относительно операции коммутирования системы векторных полей, соответствующих множеству управляющих воздействий.

В заключение приведены постановки задач об оптимальном управлении простейшими термодинамическими процессами. С помощью принципа максимума получены результаты, касающиеся наиболее экономичных циклов, осуществляемых при различных ограничениях, известных из термодинамики как циклы Карно, Отто и Брайтона.