

УДК 519.6

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Ю.Л. Муромцев

*Кафедра «Конструирования радиоэлектронных
и микропроцессорных систем», ТГТУ*

Ключевые слова и фразы: задачи оптимального управления; идентификация модели; информационные технологии; множество состояний функционирования; полный анализ оптимального управления; синтез в реальном времени.

Аннотация: Рассматриваются проблемы разработки систем энергосберегающего управления динамическими объектами применительно к основным этапам жизненного цикла: предпроектные исследования и формализация задачи оптимального управления, идентификация модели динамики объекта, анализ и синтез оптимального управления, внедрение и сопровождение систем энергосберегающего управления в процессе эксплуатации.

Введение

Быстрое развитие микропроцессорной техники, повышение цен на энергоносители, обострение конкурентной борьбы в области высоких технологий и ряд других факторов (экологических, экономических, социальных) привели к возможности и необходимости создания систем энергосберегающего управления динамическими объектами. К таким объектам, прежде всего, относятся тепловые аппараты, машины с электроприводами и транспортные средства. Теоретические и практические исследования показывают, что при оптимальном управлении динамическими режимами таких объектов экономия энергоресурсов составляет от 5 до 30 % по сравнению с обычным (традиционным) управлением.

Вместе с тем создание и внедрение систем энергосберегающего управления (СЭУ) связано с решением ряда сложных задач. Во-первых, формализация и решение задачи оптимального управления (ЗОУ), а также идентификация модели динамики объекта представляют собой трудоемкие научные исследования, требующие привлечения специалистов высокого класса. Во-вторых, в процессе реальной эксплуатации объектов происходят изменения производственных и других ситуаций, что ведет к изменениям исходных данных ЗОУ, а, следовательно, к необходимости получения нового решения сложной задачи. В-третьих, управляющее устройство, которое рассчитывает оптимальное управление, должно быть, с одной стороны, достаточно дешевым (чтобы его использование было экономически оправдано), с другой стороны, обладать большими вычислительными возможностями, позволяющими оперативно рассчитывать оптимальное управление при изменении исходных данных [1].

Следует заметить, что энергосберегающее управление играет большую роль при использовании альтернативных источников энергии, его идеи начинают при-

меняться при управлении проектами, организациями и предприятиями, экономической регионов.

В настоящей статье рассматриваются основные проблемы, встречающиеся при разработке и внедрении систем энергосберегающего управления, которые должны учитывать возможные изменения состояний функционирования в процессе эксплуатации объектов.

1 Основные понятия

Необходимые понятия и определения введем на примере математической постановки одной из традиционных ЗОУ – задач с ограничением на управление u , фиксированным временным интервалом $[t_0, t_k]$ и закрепленными концами траектории изменения вектора фазовых координат $z = (z_1, \dots, z_n)^T$, которая записывается в виде

$$\dot{z} = f(z, u, w; A, B, C, \Theta, t), \quad (1)$$

$$\forall t \in [t_0, t_k]: u(t) \in [u_n, u_b], \quad (2)$$

$$z(t_0) = z^0, \quad z(t_k) = z^k, \quad (3)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f_0(z, u, t), dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где u_n, u_b – нижняя и верхняя границы изменения управления u (в данном случае скалярного); z^0, z^k – начальное и конечное значение вектора z ; w – возмущающее воздействие; $f: R^n \times R \times R \rightarrow R^n$; $f_0: R^n \times R \rightarrow R$; J – минимизируемый функционал; A, B, C – массивы параметров модели объекта (при z, u, w), Θ – массив времен запаздывания по каналам u и w .

В результате решения задачи (1) – (4) требуется определить оптимальную программу

$$u^*(\cdot) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]) \quad (5)$$

или синтезирующую функцию

$$u^*(t) = s(z(t), t_k - t), \quad (6)$$

которые обеспечивают перевод объекта с моделью динамики (1) при ограничении на управление (2) из начального состояния z^0 в конечное z^k за время $t_k - t_0$ при минимуме функционала (4), а также оптимальную траекторию $z^*(\cdot) = (z^*(t), t \in [t_0, t_k])$ и значение функционала J^* .

Сокращенно данную ЗОУ будем обозначать четверкой [2, 3]

$$\langle M, F, S, O \rangle \stackrel{\Delta}{=} \mathcal{J}, \quad (7)$$

здесь M – модель объекта; F – вид минимизируемого функционала; S – стратегия реализации оптимального управления (программная или позиционная) и O – характерные ограничения и связи.

Четверка (7) по существу является моделью ЗОУ.

Для численного решения ЗОУ (1) – (4), т.е. определения конкретного вида функций оптимального управления (ОУ) $u^*(t)$ (или синтезирующей функции (6)) и ее параметров, а также значений $z^*(t)$, $t \in [t_0, t_k]$ и $J^* = J(u^*)$ задается массив исходных данных (реквизитов)

$$R = (A, B, C, \Theta, u_n, u_b, z^0, z^k, t_0, t_k). \quad (8)$$

Определение 1. Если на временном интервале управления $[t_0, t_k]$ четверка J и значения массива R остаются неизменными, то будем говорить, что ЗОУ (7) с массивом (8) соответствует одному состоянию функционирования h . Данное обстоятельство может отражаться индексом у соответствующих обозначений J_h, R_h, A_h и т.д.

В процессе эксплуатации конкретного объекта управления вследствие отказов технических средств, смены производственных ситуаций и т. п. могут изменяться как отдельные компоненты модели ЗОУ, например, вид минимизируемого функционала, стратегия реализации ОУ и т.д., так и значения составляющих массива R . Эти изменения в J и R соответствуют смене значений переменной h [4].

Определение 2. Возможные значения переменной h , которым соответствуют различные модели ЗОУ и значения массива R применительно к конкретному объекту управления в процессе его эксплуатации, образуют множество состояний функционирования (МСФ) H_0 .

В общем случае множество H_0 можно ввести как декартово произведение

$$H_0 = M \times \mathcal{F} \times \mathcal{S} \times O \times R,$$

здесь $M, \mathcal{F}, \mathcal{S}, O, R$ – множества, соответственно, различных моделей динамики объекта, видов функционала, стратегий управления, ограничений и значений массива R .

Таким образом, в отличие от переменной состояния (вектора фазовых координат) z объекта, которая обычно является гладкой функцией времени, переменная h скачкообразно изменяет свое значение при изменении модели M , вида функционала F и т.д. Изменения h могут происходить как в случайные, так и заранее планируемые моменты времени. Траекторию изменения h будем рассматривать как ступенчатую кусочно-постоянную функцию, т.е.

$$h(\cdot) = (h(t) = h_0, \forall t \in [t_0, t_1]; h(t) = h_1, \forall t \in [t_1, t_2]; \dots), \quad (9)$$

где t_1, t_2, \dots – моменты времени изменения значения переменной h .

Такое введение множества H_0 соответствует постулатам дополнительности (системы, находясь в различных ситуациях, могут проявлять различные системные свойства, в том числе альтернативные) и многообразия моделей (определение характеристик системы производится с помощью множества моделей, которые различаются математическими зависимостями и физическими закономерностями, выбор модели зависит от цели анализа и синтеза и особенностей системы) принципа моделируемости, в соответствии с которым сложная система может быть представлена конечным множеством моделей, каждая модель отражает определенную грань сущности системы [5].

В зависимости от того, изменяется или нет значение h на временном интервале $[t_0, t_k]$ и известно ли значение h в каждый момент времени, возможны четыре класса СЭУ на множестве состояний функционирования (МСФ) или сокращенно четыре класса СЭУ [4, 6].

Определение 3. СЭУ относится к первому классу \mathcal{K}_1 (или \mathcal{K}_h), если на интервале $[t_0, t_k]$ значение переменной h постоянно и известно, т.е. управляющее устройство решает задачу J_h с данными R_h .

В данном случае изменения h происходят как бы вне временных интервалов $[t_0, t_k]_h$, $h \in H_0$, например, меняется сырье или вид продукции.

Определение 4. СЭУ относится ко второму классу \mathcal{K}_2 (или \mathcal{K}_H); если на интервале $[t_0, t_k]$ значение переменной h постоянно, но точно неизвестно, а известно, что $h \in H \subset H_0$, иногда могут быть известны вероятности $p(h)$, $p \in H$. Здесь управляющее устройство должно определить ОУ для множества двоек $\{(J_h, R_h), h \in H\}$.

Этот класс аналогичен классу стохастических систем, например, параметр модели динамики рассматривается как случайная величина [7].

Определение 5. СЭУ относится к третьему классу \mathcal{K}_3 (или $\mathcal{K}_{h(\cdot)}$); если на интервале $[t_0, t_k]$ значение переменной h может изменяться в соответствии с траекторией (9), при этом в моменты времени t_1, t_2, \dots новые значения h_1, h_2, \dots сразу же становятся известными. В этом случае управляющее устройство в моменты t_1, t_2, \dots должно оперативно рассчитывать новое ОУ.

Этот класс в некотором смысле родственен системам с переменной структурой описываемых дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [8 – 10].

Определение 6. СЭУ относится к четвертому классу \mathcal{K}_4 (или $\mathcal{K}_{H(\cdot)}$), если на интервале $[t_0, t_k]$ значения h могут изменяться, но моменты времени t_1, t_2, \dots и соответствующие значения h_1, h_2, \dots неизвестны, известно лишь значение h в начальный момент времени ($h(t_0) = h_0$). В данном случае управляющее устройство при расчете ОУ должно учитывать «пучок» возможных траекторий $\{h_v(\cdot), v = 1, 2, \dots\}$.

Наряду с множеством H_0 , которое вводится при разработке СЭУ для конкретного объекта, введем множество H_R для определенной модели ЗОУ.

Определение 7. Возможные значения переменной h , которым соответствуют все физические реализуемые значения компонентов массива R применительно к определенной модели ЗОУ J для любых объектов управления, образуют МСФ H_R .

Множество H_R вводится как декартово произведение

$$H_R = A \times B \times C \times \Theta \times U_{\text{гп}} \times Z_k \times \mathcal{F},$$

где $A, B, C, \Theta, U_{\text{гп}}, Z_k, \mathcal{F}$ – множества соответственно значений параметров моделей динамики A, B, C , времен запаздывания Θ , границ управления $[u_n, u_b]$, закрепленных концов z^0, z^k траекторий $z(\cdot)$ и временного интервала $[t_0, t_k]$.

Из введенных определений и понятий видно: при разработке СЭУ необходимо учитывать к какому классу может быть отнесена СЭУ, а также характеристики множеств H_0 и H_R .

2 Задачи разработки СЭУ

Разработка СЭУ для конкретного объекта представляет собой наукоемкий проект со значительными экономическими затратами. Декомпозиция общей задачи проектирования СЭУ на основные подзадачи приведена на рис. 1.

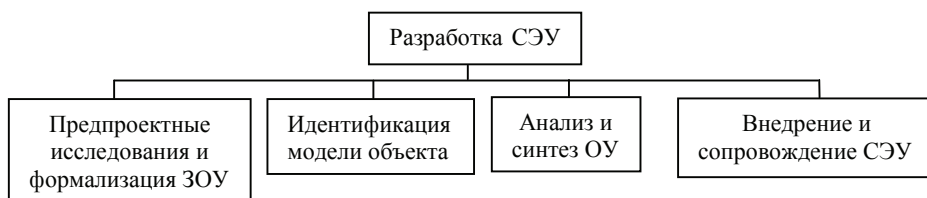


Рис. 1 Декомпозиция задачи проектирования СЭУ

Для формализации ЗОУ проводятся предпроектные исследования, т.е. определяются свойства объекта и его особенности при реальной эксплуатации, выдвигаются гипотезы о возможном виде минимизируемого функционала и стратегиях реализации ОУ, рассматриваются ограничения на изменение фазовых координат и управляющие воздействия. По результатам этих исследований в общем виде записывается математическая постановка ЗОУ, например, в виде (1) – (4). При этом указываются размерности переменных z , u , w , возможные области их изменения и т.п.

Построение модели динамики исследуемого объекта предполагает определение вида основных уравнений, которые, с одной стороны, могут быть использованы при анализе и синтезе ОУ, с другой – достаточно точно отражают реальные процессы, а также оценку параметров модели по экспериментальным данным и проверку адекватности модели в различных состояниях функционирования.

Задачи анализа и синтеза ОУ являются наиболее сложными и трудоемкими. На данном этапе исследований окончательно формулируется ЗОУ с учетом полученной модели динамики, выполняется полный анализ ЗОУ на МСФ (если он не был выполнен ранее), решаются задачи синтеза алгоритмического обеспечения для управляющего устройства, выбирается стратегия реализации ОУ и т.д.

Определение 8. Полный анализ ЗОУ (7) предполагает определение условий существования решения задачи в зависимости от значений компонентов массива R , возможных видов функций ОУ (или синтезирующих функций), соотношений для расчета параметров ОУ и границ областей различных видов ОУ, а также соотношений для решения обратных задач оптимального управления.

На заключительном этапе разработки СЭУ производится выбор аппаратных средств, разработка программного обеспечения и сопровождение функционирования системы в процессе эксплуатации.

3 Направления повышения эффективности СЭУ

Опыт проведения работ по созданию СЭУ, выполняемых на кафедре КРЭМС ТГТУ, для различных объектов показывает, что в ряде случаев не удается получить ожидаемого эффекта от внедрения систем управления. Причинами этого в основном являются не полное проведение исследований при формализации ЗОУ, низкая точность моделей динамики, недостаточное использование возможностей математического аппарата анализа и синтеза ОУ, а также современных информационных технологий. Рассмотрим основные проблемы повышения эффективности СЭУ применительно к подзадачам, выделенным на рис. 1.

3.1 Предпроектные исследования и формализация ЗОУ

Первый этап исследований оказывает существенное влияние на риск успешного выполнения проекта по разработке и внедрению СЭУ. Для этого должны быть решены следующие проблемы.

1. Разработка методов и алгоритмов прогнозирования ожидаемого эффекта энергосбережения, учитывающих долю функционирования объекта в динамиче-

ских режимах, погрешности математических моделей, влияние возмущающих воздействий, потребление энергии управляющими и исполнительными устройствами и т.д.

2. Создание интеллектуальных баз данных, содержащих информацию о результатах использования СЭУ для различных классов объектов – тепловых, машин с электроприводами и др.

3. Разработка методик введения расширенного множества состояний функционирования, учитывающего возможные ситуации, которые могут иметь место для объекта в условиях реальной эксплуатации [11].

4. Создание методов для автоматизированного формирования множества альтернативных вариантов постановок ЗОУ, их сравнения, оценки рисков и определения наиболее предпочтительных.

3.2 Идентификация модели

Модель динамики объекта, используемая при синтезе ОУ простыми микропроцессорными устройствами, должна удовлетворять ряду требований, отдельные из них противоречивы. Основными требованиями являются: достаточная точность в широком диапазоне изменения фазовых координат, пригодность для оперативного решения ЗОУ, возможность использования в различных состояниях функционирования, учет влияния различного ряда возмущающих воздействий и др.

В связи с этим большую актуальность имеют исследования по следующим направлениям.

1. Построение модели динамики сложных объектов с распределенными параметрами и приведение их к виду, позволяющему выполнить полный анализ ЗОУ на МСФ, синтез управляющих воздействий в реальном времени и совмещенный синтез ОУ.

2. Разработка методов «быстрой» идентификации моделей с большим числом параметров, в т.ч. коэффициентов дифференциальных уравнений, времен запаздывания по различным каналам управления и возмущения, времен переключения для дифференциальных уравнений с разрывной правой частью.

3. Разработка моделей, позволяющих прогнозировать изменения возмущающих воздействий и состояний функционирования.

3.3 Анализ и синтез ОУ

Выполнение работ по анализу и синтезу ОУ связано с наиболее сложными проблемами, требующими наукоемких исследований.

1. Важной проблемой является автоматизация работ по развитию базы знаний (БЗ) интеллектуальной САПР алгоритмического обеспечения СЭУ, так как проведение полного анализа ЗОУ может быть выполнено только специалистами высокой квалификации при больших временных затратах. Требуется разработать методы, позволяющие при создании фреймов БЗ в полной мере использовать уже имеющиеся фреймы, применять специализированные программные продукты для вывода необходимых соотношений.

2. Необходимо разработать метод синтезирующих переменных и комбинированный метод для выполнения полного анализа ЗОУ с векторным управлением, при наличии запаздывания, возмущающих воздействий, для нелинейных моделей динамики и высокой размерности вектора фазовых координат, а также комбинированных минимизируемых функционалах (квадратичном, топливо и быстродействие и т.п.) [12, 13].

3. Требуется разработать методику выбора наилучшей стратегии реализации ОУ при наличии помех (неконтролируемых возмущений) по каналам управления и измерения выходной переменной.

4. Важной проблемой является создание методологии решения обратных задач оптимального управления, которые могут расширить область использования энергосберегающего управления [14].

5. Практически мало исследованы вопросы энергосберегающего управления гибридными и другими объектами, которые используют несколько источников энергии [15].

6. Возможности современной микропроцессорной техники и полученные результаты полного анализа ЗОУ позволяют начать создание интеллектуальных СЭУ, которые могут выполнять функции поиска и принятия решений в условиях неопределенности, при вырожденном ОУ и т.п.

7. К настоящему времени задачи анализа и синтеза в основном решены для систем 1-го и 3-го классов на МСФ. На практике многие объекты функционируют в условиях, соответствующих 2-му и 4-му классам. Для этих систем требуется разработка алгоритмов гарантированного управления, обеспечивающих выполнение цели управления с задаваемой вероятностью при любых изменениях состояний функционирования [16].

3.4 Внедрение и сопровождение СЭУ

Системы энергосберегающего оптимального управления относятся к категории наукоемкой высокотехнологичной продукции. Ожидаемый эффект от ее внедрения достигается при грамотном обслуживании и обеспечении возможности внесения изменений в алгоритмическое обеспечение, при смене производственных ситуаций, например, переход на выпуск новой продукции, использование другого энергоносителя и т.п. Поэтому эффективное функционирование СЭУ в реальных условиях во многом определяется решением следующих задач.

1. Создание компьютерной сети, позволяющей проводить обучение и консультации обслуживающего персонала СЭУ в режиме удаленного доступа.

2. Разработка автоматизированных рабочих мест (АРМ) для проектировщиков алгоритмического обеспечения СЭУ и создание сетевой технологии доступа к БЗ интеллектуальной САПР.

3. Разработка методов и программного обеспечения для использования технологии Mini Webserver для внесения изменений в алгоритмическое обеспечение СЭУ из удаленно расположенного АРМ.

Заключение

В качестве заключения приведем проблемы общего характера при решении задач энергосберегающего управления.

1. Вопросы энергосберегающего управления должны рассматриваться во взаимосвязи с другими методами снижения энергозатрат – внесение конструктивных изменений в объекте, переход на более дешевые энергоносители и т.п. Например, для тепловых аппаратов это может быть повышение теплоизоляции, для машин с электроприводами – замена одного мощного электродвигателя двумя средней мощности, которые работают вместе лишь при пуске.

2. Для сокращения сроков и материальных затрат на разработку СЭУ необходимо создание единой информационно-технологической среды (ИТС), включающей экспертную систему с базой знаний, автоматизированные рабочие места проектировщиков алгоритмического и программного обеспечения и позволяющую использовать метод динамической альтернативности для снижения риска при выполнении проектов.

3. Создание ИТС и разработка СЭУ должны выполняться в соответствии с требованиями CALS-технологий. Для этого требуется создание функциональных и информационных моделей, охватывающих все этапы жизненного цикла систем управления, интерактивных технических руководств, применение методов «параллельной» разработки продукции.

Список литературы

1. Муромцев Ю.Л. Микропроцессорные системы энергосберегающего управления: Учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов: ТГТУ, 2001. – 80 с.
2. Орлова Л.П. Концепция моделирования и вычислительная среда для оперативного проектирования энергосберегающих систем управления / Л.П. Орлова, Д.Ю. Муромцев // Новые информационные технологии: Материалы второго научно-практ. семинара. – М.: МГИЭМ, 1999. – С. 111 – 113.
3. Муромцев Ю.Л. Информационные технологии в проектировании энергосберегающих систем управления динамическими режимами: Учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов: ТГТУ, 2000. – 84 с.
4. Муромцев Ю.Л. Моделирование и оптимизация систем при изменении состояний функционирования / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, О.В. Попова. – Воронеж: ВГУ, 1992. – 164 с.
5. Малин А.С. Исследование систем управления: Учеб. для вузов / А.С. Малин, В.И. Мухин. – М.: ГУ ВШЭ, 2002. – 400 с.
6. Ляпин Л.Н. Гарантированная оптимальная программа управления на множестве состояний функционирования / Л.Н. Ляпин, Ю.Л. Муромцев // Автоматика и телемеханика. – 1993: № 3. – С. 85 – 93.
7. Аоки М. Оптимизация стохастических систем / М. Аоки. – М.: Наука, 1971. – 424 с.
8. Теория систем с переменной структурой / Под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592 с.
9. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью / А.Ф. Филиппов. – М.: Наука, 1985. – 224 с.
10. Муромцев Ю.Л. Идентификация моделей, учитывающих изменение состояний функционирования / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова, Д.Ю. Муромцев // Радиосистемы. Обработка сигналов и полей. – 2000. – Вып. 43. – № 3. – С. 45 – 48.
11. Муромцев Д.Ю. Расширение понятия состояний работоспособности сложных технических систем в задачах управления проектами и рисками / Д.Ю. Муромцев, С.А. Блохин // Надежность. – 2003. – № 4. – С. 3 – 8.
12. Муромцев Ю.Л. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, Е.В. Сатина // Изв. вузов. Приборостроение. – 1993. – № 11 – 12. – С. 19-25.
13. Муромцев Д.Ю. Синтез энергосберегающего управления многостадийными процессами комбинированным методом / Д.Ю. Муромцев, Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 3. – С. 169 – 178.
14. Муромцев Д.Ю. Обратные задачи моделирования при анализе и синтезе энергосберегающего управления. / Д.Ю. Муромцев // Актуальные проблемы информатики и информационных технологий: Материалы III-ей Тамб. межвуз. науч. конф. – Тамбов: ТГУ им. Г.Р. Державина, 1999. – С. 62 – 63.
15. Ляпин Л.Н. Об одном случае энергосберегающего программного управления гибридными объектами / Л.Н. Ляпин, Ю.Л. Муромцев, О.В. Попова // Изв. АН. Теория и система управления. – 1996. – № 1. – С. 10 – 15.
16. Муромцев Ю.Л. О гарантированном оптимальном управлении на множестве состояний функционирования / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин // Динамика неоднородных систем. – М.: ВНИИСИ, 1989. – С. 162 – 168.

Problems of Power Saving Control

Yu.L. Muromtsev

Department «Constructing of radio-electronic and microprocessor systems», TSTU

Key words and phrases: complete analysis of optimum control; identification models; information technology; real-time synthesis; set of operation conditions; tasks of optimum control.

Abstract: Problems of designing power saving controls systems of dynamic objects, with reference to the basic stages of life cycle: pre-design studies and formalization of optimum control task, model identification of object dynamics, analysis and synthesis of optimum control, introduction and system management in service are considered.

Probleme der energiesparenden Steuerung

Zusammenfassung: Es werden die Probleme der Erarbeitung der Systeme der energiesparenden Steuerung von den dynamischen Objekten gemäß den Hauptetappen des Lebenszyklus betrachtet. Das sind die Vorprojektierungsuntersuchungen und die Formalisierung der Aufgabe der Optimalsteuerung, die Identifizierung des Modells der Objektdynamik, die Analyse und die Synthese der Optimalsteuerung, die Einführung und die Begleitung des Systems im Prozess der Ausbeutung.

Problèmes de la commande conservant de l'énergie

Résumé: Sont examinés les problèmes de l'élaboration des systèmes de la commande conservant de l'énergie par des objets dynamiques pour les étapes essentielles du cycle vitale – études effectuées avant l'élaboration du projet et formalisation du problème de la commande optimale, identification du modèle de la dynamique de l'objet, analyse et synthèse de la commande optimale, lancement et maintien du système au processus de l'exploitation.
