

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПО ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЗАДАЧИ РОСТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЯ

Готовец Мария Алексеевна

● Объект исследования

- ▶ Процесс экономического развития страны технологического последователя, заимствующего технологии страны-лидера
- ▶ Задача оптимального управления распределением трудовых ресурсов страны-последователя

● Цели работы

- ▶ Проанализировать решение задачи оптимального экономического роста страны-последователя при различных параметрах
- ▶ Применить методы управления по прогнозирующей модели с целью аппроксимации решения задачи с бесконечным горизонтом последовательным решением прогнозирующих задач с конечным горизонтом
- ▶ Исследовать три различных подхода к построению прогнозирующих задач

Задача оптимального роста технологического последователя

- A — страна-лидер, выделяет в исследовательский сектор долю $L_N^A(t)$ трудовых ресурсов
- B — страна-последователь, выделяет в исследовательский сектор долю $L_N^B(t)$ трудовых ресурсов, заимствует технологии у A

$$\int_0^\infty e^{-\rho^B t} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \ln N^B(t) + \ln(L^B - L_N^B(t)) \right\} dt \rightarrow \max_{L_N^B} \quad (1)$$

$$\dot{N}^A(t) = g^A N^A(t), \quad N^A(0) = N_0^A$$

$$\dot{N}^B(t) = \frac{L_N^B}{a^B} (N^B(t) + \gamma N^A(t)), \quad N^B(0) = N_0^B, \quad L_N^B(t) \in [0, L^B[$$

- ▶ $g^A, L^B, a^B, \gamma > 0$ — заданные параметры
- ▶ $N_0^A > 0, N_0^B > 0$ — заданные начальные состояния

Задача оптимального роста технологического последователя

- Замена переменных

$$x(t) = N^B(t), \quad b = \frac{L^B}{a^B}, \quad u(t) = \frac{L_N^B(t)}{a^B}, \quad \rho = \rho^B$$

$$y(t) = N^A(t), \quad \nu = g^A, \quad \kappa = \frac{1}{\alpha} - 1$$

$$J(x, u) = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\kappa \ln x(t) + \ln(b - u(t))] dt \rightarrow \max \quad (2)$$

$$\dot{x}(t) = u(t)(x(t) + \gamma y(t)), \quad x(0) = x_0$$

$$\dot{y}(t) = \nu y(t), \quad y(0) = y_0$$

$$u(t) \in [0, b - \varepsilon]$$

- $b, \gamma, \rho, \nu, \kappa > 0, \varepsilon > 0, \gamma < 1; x_0, y_0 > 0$

- Замена переменных с целью понижения размерности:

$$z(t) = \frac{x(t)}{y(t)}, \quad t \geq 0, \quad z_0 = \frac{x_0}{y_0}$$

- Редуцированная задача

$$I(z, u) = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\kappa \ln z(t) + \ln(b - u(t))] dt \rightarrow \max \quad (3)$$

$$\dot{z}(t) = u(t)(z(t) + \gamma) - \nu z(t), \quad z(0) = z_0$$

$$u(t) \in [0, b - \varepsilon], \quad t \geq 0$$

$z \in \mathbb{R}$ — состояние системы, $u \in \mathbb{R}$ — управление

- (3) — задача оптимального управления нелинейной системой с критерием качества типа Лагранжа, бесконечный горизонт

- На основе принципа максимума Л.С. Понтрягина устанавливается, что решение удовлетворяет гамильтоновой системе:

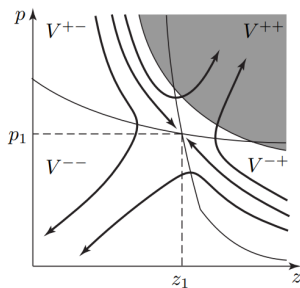
$$\dot{z}(t) = (b - \nu)z(t) + b\gamma - \frac{1}{p(t)} \quad (4)$$

$$\dot{p}(t) = -(b - \nu - \rho)p(t) - \frac{\gamma\kappa + (\kappa + 1)z(t)}{z(t) + \gamma}z(t)$$

- Уравнения для (z_1, p_1) :

$$p = \frac{1}{b\gamma - (\nu - b)z}$$

$$\frac{1}{b\gamma - (\nu - b)z} = \frac{\gamma\kappa + (\kappa - 1)z}{\beta_0(z + \gamma)z}$$



Типичные фазовые траектории
решений гамильтоновой системы

- Модель объекта управления

$$\dot{x}(s) = f(x(s), u(s), s), \quad x(t) = x_t, \quad s \geq t \quad (5)$$

$x(s) \in \mathbb{R}^n$, $u(s) \in \mathbb{R}^r$ — состояния и управления модели (5)

- В модели (5) считаются заданными:

- ▶ множество $X_0 \subset \mathbb{R}^n$ всех возможных начальных состояний объекта управления в начальный момент времени t_0 ($t \geq t_0$)
- ▶ n -вектор x_t (при $t \geq t_0$) — состояние физического объекта в момент времени t
- ▶ функция $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$, обеспечивает существование и единственность решений $x(s)$, $s \geq t$, уравнения (5) при любых кусочно-непрерывных управлениях $u(s)$, $s \geq t$, и начальных состояниях $x_t \in X_0$
- ▶ множества доступных значений управления $U(t) \subseteq \mathbb{R}^r$, $t \geq t_0$

Предположение

- Для всех $t \in \mathbb{R}$ множество $U(t)$ содержит начало координат и $f(0, 0, t) = 0, t \geq t_0$
- Функция f непрерывна по своим аргументам и удовлетворяет условию Липшица по переменной x для любой фиксированной пары (t, u)
- Множество $U(t)$ компактно для всех t и для каждой пары (t, x) множество $f(x, U(t), t)$ выпукло
- Для любого компакта $X \subset \mathbb{R}^n$, множество $\{\|f(x, u, t)\|, t \in \mathbb{R}, x \in X, u \in U(t)\}$ — компакт

Управление по прогнозирующей модели Model Predictive Control (MPC)

Прогнозирующая задача оптимального управления

$$\begin{aligned}\mathcal{P}(t, x_t, T) : \quad & \int_t^{t+T} L(x(s), u(s), s) ds + W(t+T, x(t+T)) \rightarrow \min \\ & \dot{x}(s) = f(x(s), u(s), s), \quad x(t) = x_t \\ & u(s) \in U(s), \quad s \in [t, t+T] \\ & x(t+T) \in S\end{aligned}\tag{6}$$

Параметры MPC-регулятора:

- 1 горизонт управления T
- 2 функции текущей и конечной (терминальной) стоимостей L и W
- 3 терминальное множество $S \subset \mathbb{R}^n$

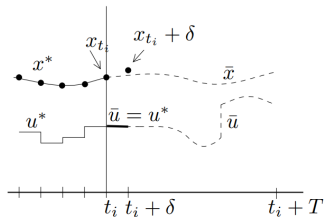
Алгоритм MPC

- ❶ Измерить текущее состояние объекта x_{t_i}
- ❷ Вычислить оптимальное (программное) управление $u^0(t)$, $t \in [t_i, t_i + T]$, задачи $\mathcal{P}(t_i, x_{t_i}, T)$
- ❸ Управление

$$u^*(t) := u^0(t), t \in [t_i, t_i + \delta] \quad (7)$$

подать на вход объекта управления

- ❹ Процедуру повторить для следующего момента $t_{i+1} = t_i + \delta$



При выполнении предположений, ряда условий устойчивости и для достаточно малого периода квантования δ система, замкнутая обратной связью (7), асимптотически устойчива

В задаче стабилизации L – параметр настройки, условно он выбирается "пользователем", а L в экономическом MPC – задается исходя из экономических требований к процессу.

Поэтому необходимо учитывать:

- ❶ Условие $L(x_1, u_1) \leq L(x, u)$, как правило, не выполняется
- ❷ Положение равновесия (x_1, u_1) теперь определяется не из условия $f(x, u) = 0$, как в стабилизирующем MPC, а из задачи нелинейного программирования

$$\begin{aligned} L(x, u) &\rightarrow \min \\ f(x, u) &= 0 \\ u &\in U, x \in X \end{aligned} \tag{8}$$

Устойчивое положение (x_1, u_1) называется магистралью.

Подход 1: Прогнозирующая задача для неограниченного ЕМРС

- В задаче экономического роста (3) заменим бесконечный горизонт управления конечным
- Дополнительные условия на правый конец траектории не накладываем

$$\begin{aligned} I_1(z, u) &= \int_{\tau}^{\tau+T} e^{-\rho t} [\kappa \ln z(t) + \ln(b - u(t))] dt \rightarrow \max \\ \dot{z}(t) &= u(t)(z(t) + \gamma) - \nu z(t) \\ z(\tau) &= \frac{x(\tau)}{y(\tau)} \\ u(t) &\in [0, b - \varepsilon], \quad t \in [\tau, \tau + T] \end{aligned} \tag{9}$$

- В прогнозирующую задачу добавим терминальное ограничение-равенство
- Потребуем, чтобы в терминальный момент состояние равнялось магистральному значению z_1

$$I_2(z, u) = \int_{\tau}^{\tau+T} e^{-\rho t} [\kappa \ln z(t) + \ln(b - u(t))] dt \rightarrow \max$$

$$\dot{z}(t) = u(t)(z(t) + \gamma) - \nu z(t) \quad (10)$$

$$z(\tau) = \frac{x(\tau)}{y(\tau)}, \quad z(\tau + T) = z_1$$

$$u(t) \in [0, b - \varepsilon], \quad t \in [\tau, \tau + T]$$

- В прогнозирующую задачу добавим терминальную стоимость
- В работе обосновывается, что в качестве терминальной стоимости необходимо выбрать

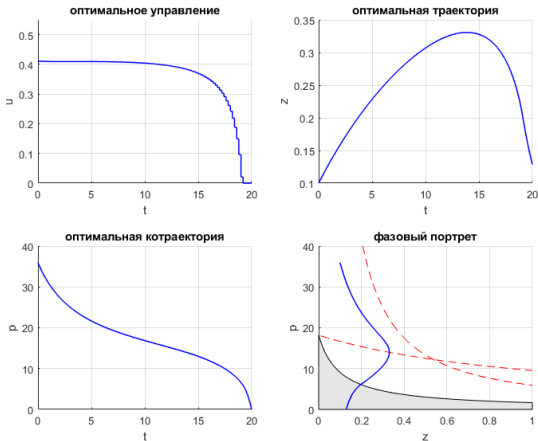
$$W(z(\tau + T), \tau + T) = e^{-\rho(\tau+T)} p_1 z(\tau + T) \quad (11)$$

p_1 — магистральное значение сопряженной переменной

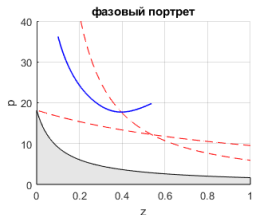
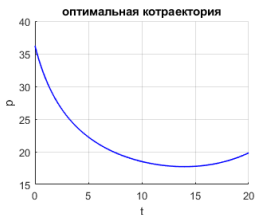
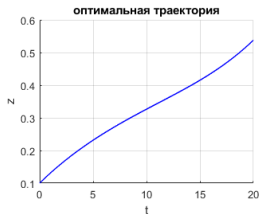
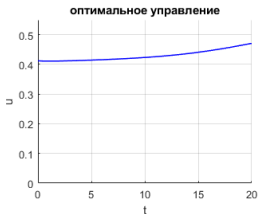
$$I_3(z, u) = e^{-\rho(\tau+T)} p_1 z(\tau+T) + \int_{\tau}^{\tau+T} e^{-\rho t} [\kappa \ln z(t) + \ln(b - u(t))] dt \rightarrow \max$$

$$\dot{z}(t) = u(t)(z(t) + \gamma) - \nu z(t), \quad z(\tau) = \frac{x(\tau)}{y(\tau)} \quad (12)$$

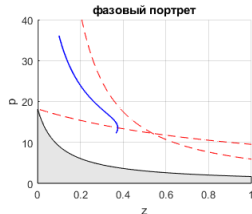
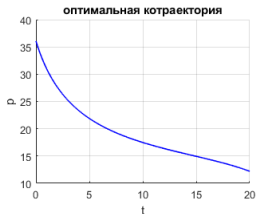
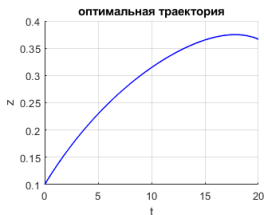
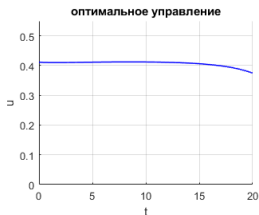
$$u(t) \in [0, b - \varepsilon], \quad t \in [\tau, \tau + T]$$



- Оптимальные траектории имеют продолжительные промежутки убывания и далеки от магистрали



- Участков убывания оптимальной траектории нет и значения уже ближе к магистральным, но время решения на 61% больше



- Участки убывания оптимальной траектории сократились

Сравнения программных решений в подходах 1-3

Рис.: Подход 1

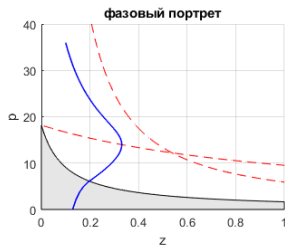


Рис.: Подход 2

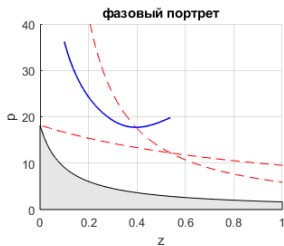
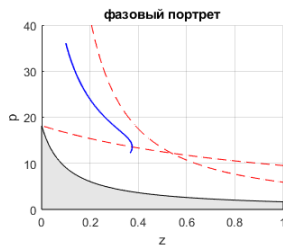
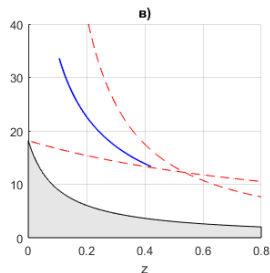
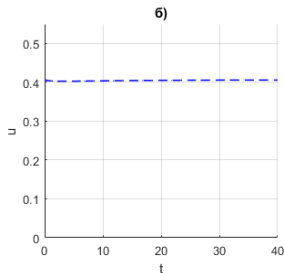
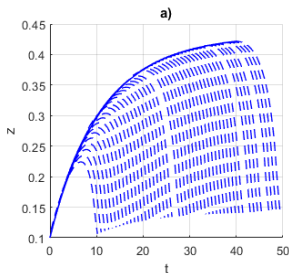


Рис.: Подход 3



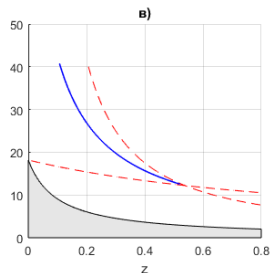
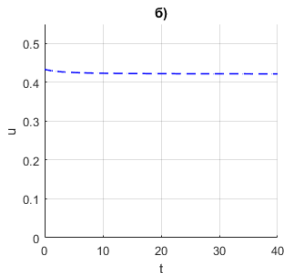
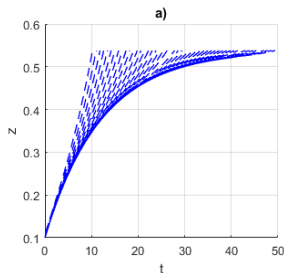
Параметры:

$$\gamma = 0.1, \nu = 0.5, b = 0.55, \rho = 0.15, \kappa = 1.5, z_0 = 0.1$$



- При $T = 10$ траектория замкнутой системы не достигает магистрали
- При увеличении T до 30 траектория достигает магистрали, однако время решения прогнозирующей задачи возрастает в 7.15 раз

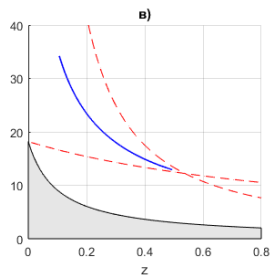
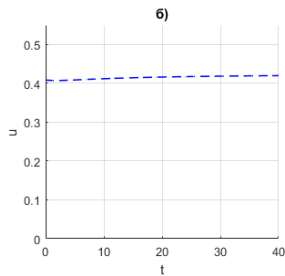
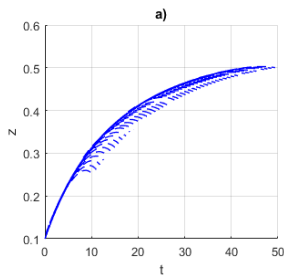
Подход 2: EMPC с ограничениями-равенствами



Недостатки задачи с терминальным ограничением-равенством:

- трудоемкость решения задачи
- начальная недопустимость задачи с ограничением-равенством

Подход 3: EMPC с терминальной стоимостью



- Траектория замкнутой системы достигает магистрального значения
- Прогнозирующая задача имеет решение при любом горизонте T

- Проведено сравнение трех вариантов метода EMPC
 - ▶ неограниченный EMPC
 - ▶ EMPC с терминальным ограничением типа равенства
 - ▶ EMPC с терминальной стоимостью
- Исследованы параметры, позволяющие получить решение асимптотически приближающие магистральное значение
- В результате численных экспериментов продемонстрированы преимущества третьего подхода
 - ▶ Простой выбор терминальной стоимости
 - ▶ Задача оптимального управления проще с точки зрения численного решения
 - ▶ Задача проще с вычислительной точки зрения
 - ▶ Имеет решение при любом горизонте T

Спасибо за внимание!