УДК 517.97:621.3.01

О.Г. Фролова, аспір.
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

МЕТОД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО СИНТЕЗУ ЗАМКНЕНИХ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ЗМІЩЕНИХ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Запропоновано метод багатокритеріального синтезу замкнених законів керування, що є адаптований до дії зовнішніх збурень. Для реалізації методу застосовано математичний апарат зміщених диференційних перетворень, який дозволяє підвищити точність моделювання.

Потреба у розв'язку задач багатокритеріального синтезу законів керування виникає у різних областях науки і техніки, наприклад, таких, як керування наземним, морським та повітряним транспортом, а також керування аерокосмічними літальними апаратами. Обчислювальна складність багатокритеріальної оптимізації лінійно залежить від розмірності векторного критерію і експоненціально від розмірності простору станів [1]. В [2] з позиції зменшення обчислювальної складності була показана ефективність застосування скалярної згортки часткових критеріїв за нелінійною схемою компромісів [3] разом з математичним апаратом диференційних перетворень [4]. Квазіаналогові багатокритеріальні моделі оптимізації динамічних процесів у [2] були побудовані на базі основних диференційних перетворень з центром розкладу оригіналу в степеневий ряд Тейлора в точці $t = 0$.

В даній роботі для розв'язку задач багатокритеріального синтезу законів керування пропонується використовувати зміщені диференційні перетворення [4], що утворюються шляхом переносу центру розкладу оригіналу в степеневий ряд Тейлора із точки $t = 0$ в зміщену точку $t = t_v$. Зміщені перетворення у порівнянні з основними дозволяють побудувати більш точні багатокритеріальні моделі на основі диференційних спектрів з обмеженою кількістю дискрет.

Розглянемо задачу багатокритеріальної оптимізації динамічних процесів у рамках наступної математичної моделі. Задано векторне диференційне рівняння, що описує керований динамічний процес

$$\frac{dx}{dt} = f(t,x,u,v), \quad x(t_0) = x_0\,, \tag{1}$$

де $x = x(t)$ – n-вимірний вектор стану; u – m-вимірний вектор керування ($m \le n$); v – l-вимірний вектор збурень; f – неперервна і неперервно диференційована за сукупністю змінних t, x, u, v вектор-функція узагальненої сили; $t \in [t_0, T]$ – час, граничне значення якого T в залежності від постановки задачі може бути заданим або не фіксованим.

Задача керування полягає в переведенні динамічного об'єкта (1) із початкового стану $x(t_0) = x_0$ в кінцевий (термінальний), який визначений в момент часу $t = T$ q-вимірним ($q \le n$) векторним рівнянням

$$S[x(T),T]=0. \tag{2}$$

Якість керування динамічним процесом (1) оцінюється сукупністю часткових критеріїв, що задані функціоналами

$$I_j = G_j[x(T),T] + \int_{t_0}^{T} \varphi_j(t,x,u,v)dt\,, \tag{3}$$

де $j = 1,2,\ldots, r$; функції G_j та φ_j мають неперервні часткові похідні по x, u, v. Часткові критерії (3) є компонентами r-вимірного векторного критерію $I = (I_1, I_2, \ldots, I_r)$.

Вважаємо, що векторний функціонал I мінімізується, а допустима область його зміни задається системою обмежень

$$I_{jm} \ge I_j \ge 0,\; j = \overline{1,r}\,, \tag{4}$$

де I_{jm} визначає верхню границю допустимого значення компоненти I_j векторного критерію I.

Математична модель (1)–(4) дозволяє врахувати обмеження на вектори стану і керування в процесі вибору вигляду функціоналів (3) і задання умов (4). Кожна компонента векторного критерію I описується функціоналом (3), що визначений на розв'язках векторного диференційного рівняння (1) при керуванні у границях допустимої області (4) з умовами на границі (2). Багатокритеріальна задача синтезу оптимального керування [3] полягає у визначенні екстремалей $\{x^*(t), u^*(t)\}$, $I^* \in (I)$, $t \in [t_0, T]$, які при заданих диференційних зв'язках (1), граничних умовах (2) та обмеженнях (4) оптимізують векторний функціонал I.

Розв'язок багатокритеріальної задачі (1)–(4) може бути отриманий різними методами. На основі аналізу різних методів розв'язку багатокритеріальної задачі в [2] обгрунтований вибір скалярної згортки часткових критеріїв за нелінійною схемою компромісів [3], яка забезпечує скорочення об'єму обчислень на засобах обчислювальної техніки. У подальшому будемо розглядати багатокритеріальну модель (1)–(4) у найбільш загальній формі скалярної згортки [2]:

$$J(u) = \sum_{j=1}^{r} \frac{\alpha_j}{\left(1 - \dfrac{I_j}{I_{jm}}\right)^{\beta_j}}, \tag{5}$$

де задані константи $\alpha_j > 0, \sum_{j=1}^{r} \alpha_j = 1$ та $\beta_j > 0$.

Скалярна згортка (5) при $\beta_j = 1, j = \overline{1,r}$ дає при мінімізації розв'язок, який належить множині Парето [3]. Обираючи потрібний вектор $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_r)$, можна одержати довільну точку із множини парето-оптимальних розв'язків.

У частковому випадку рівнозначності часткових критеріїв (3) скалярну згортку (5) можна представити у найбільш простому вигляді:

$$\bar{J}(u) = \sum_{j=1}^{r} \frac{1}{1 - \dfrac{I_j}{I_{jm}}}. \tag{6}$$

У роботі [5] показано, що коли $I_j(u), j = \overline{1,r}$, – неперервні і строго опуклі на паралелепіпеді $\Pi_u = \{u \in E^m \mid a_l \le u_l \le b_l, l = \overline{1,m}\}$ функції, то скалярна згортка (6) має єдиний мінімум на паралелепіпеді Π_u (є унімодальною). Властивість унімодальності скалярної згортки (6) суттєво спрощує розв'язок задачі оптимізації і на основі диференційних перетворень [4] дозволяє звести проблему синтезу багатокритеріального керування до розв'язку системи кінцевих рівнянь [2].

Другою важливою властивістю скалярної згортки (6) є її адаптивність до зміни вектора керування u в процесі оптимізації. У випадку наближення одного із часткових критеріїв $I_j(u)$ до верхньої границі I_{jm} допустимих значень (4) скалярна згортка (6) реалізує дію Чебишевського (мінімаксного) оператора по цьому частковому критерію, перешкоджаючи порушенню умови (4). В інших випадках скалярна згортка (6) у границях (4) діє еквівалентно оператору інтегральної оптимальності з різним ступенем вирівнювання часткових критеріїв. Погіршення одного із часткових критеріїв компенсується покращанням решти часткових критеріїв.

Застосуємо до математичної моделі (1)–(6) зміщені диференційні перетворення [4]:

$$X(k, t_\nu) = \frac{H_1^k}{k!}\left[\frac{d^k x(t_\nu + \tau)}{d\tau^k}\right]_{\tau=0}, \tag{7}$$

$$\bar{X}(k, t_\nu) = \frac{(-H_2)^k}{k!}\left[\frac{d^k x(t_\nu - \tau)}{d\tau^k}\right]_{\tau=0}, \tag{8}$$

де $X(k,t_\nu)$ та $\bar{X}(k,t_\nu)$ – дискретні функції цілочисельного аргументу $k = 0, 1, 2, \ldots$; τ – локальний аргумент, значення якого обирається в межах $H_1 \ge \tau \ge 0$; H_1 та H_2 – відрізки часового аргументу, на якому розглядаються відповідно функції $x(t_\nu+\tau)$ та $x(t_\nu-\tau)$, $H_1 > 0$ та $H_2 > 0$ повинні бути менше радіуса збіжності рядів Тейлора в околі точки t_ν.

Вираз (7) визначає пряме перетворення функції часу $x(t_\nu+\tau)$ в зображення $X(k,t_\nu)$ у формі диференційного спектру. Аналогічно, вираз (8) описує перетворення оригіналу $x(t_\nu-\tau)$ в зображення $\bar{X}(k,t_\nu)$. Величини дискретних функцій $X(k,t_\nu)$ та $\bar{X}(k,t_\nu)$ при цілочисельних значеннях аргументу k називаються дискретами відповідних диференційних спектрів.

З області зображень у часову область перехід здійснюється на основі обернених перетворень у формі рядів Тейлора:

$$x(t_\nu+\tau)=\sum_{k=0}^{\infty}\left(\frac{\tau}{H_1}\right)^k X(k,t_\nu)\,, \tag{9}$$

$$x(t_\nu-\tau)=\sum_{k=0}^{\infty}\left(\frac{\tau}{H_2}\right)^k \overline{X}(k,t_\nu)\,. \tag{10}$$

Задачу (1)–(6) можна розв'язати у формі програмного керування $u(t)$, що реалізує багатокритеріальне керування за розімкнутим контуром і гарантує виконання граничних умов (2) тільки при відсутності дії збурень $v = 0$. В реальних умовах дія зовнішнього середовища $v(t)$ на динаміку руху динамічного об'єкта (1) призводить до значних термінальних помилок в момент закінчення процесу керування за програмою $u(t)$.

Синтезуємо закон оптимального керування із зворотним зв'язком для багатокритеріальної задачі (1)–(6):

$$u = u(x,\ t), \tag{11}$$

який в кожний момент часу t використовує інформацію про поточний стан $x(t)$ динамічного об'єкта. Замкнений закон оптимального керування (11) реагує на зміну поточного стану $x(t)$ об'єкта керування (1) в результаті дії збурення $v(t)$ і тому дозволяє компенсувати дію збурюючих факторів.

Синтез закону оптимального керування (11) виконаємо методом системоаналогового моделювання. Сутність системоаналогового моделювання полягає в побудові системної моделі (системоаналога), що складається із множини моделей, кожна з яких характеризується не повним набором ознак подібності з об'єктом, що моделюється. Проте об'єднання цієї множини моделей у системоаналог дає збіжність за повним набором ознак подібності з об'єктом моделювання. Концепцію системоаналогового моделювання зручно реалізувати на основі зміщених диференційних перетворень (7) та (8). Наприклад, моделювання часової функції $x(t)$ на відрізку $[t_0, T]$ можна реалізувати двома моделями. Одна модель (8) в області зображень представляє часову функцію $x(t)$ на відрізку $[t_0,\ t_\nu]$, а друга модель (7) – на відрізку $[t_\nu,\ T]$. Об'єднання цих двох моделей (7) та (8) моделює $x(t)$ в області зображень на всьому заданому відрізку $[t_0, T]$. Таким чином, системоаналогова модель часової функції $x(t)$ на відрізку $[t_0,\ T]$ може бути представлена моделлю (8) на відрізку $[t_0,\ t_\nu]$ при $H_1 = t_\nu - t_0$ і моделлю (7) на відрізку $[t_\nu, T]$ при $H_2 = T - t_\nu$. З метою розділення цих моделей будемо називати модель (7) прямою, а модель (8) – зворотною. Пряма і зворотна моделі утворюють системоаналогову модель часової функції $x(t)$ на відрізку $[t_0,\ T]$.

Системоаналоговий синтез оптимального керування (11) виконаємо на основі двох адаптивних програмних керувань $\overline{u}(t,A)$ та $u(t,A)$, де $A = (a_1,\ a_2,\ldots,a_N)$ – вектор вільних параметрів. Будемо вимагати від керування $u(t,A)$ виконати переведення об'єкта (1) з проміжного стану $x(t_\nu)$ в зміщеній точці t_ν в кінцевий стан $x(T)$. Керування $\overline{u}(t,A)$ визначимо з умови зворотного переводу об'єкта (1) із проміжного стану $x(t_\nu)$ в початковий стан $x(t_0)=x_0$. Якщо побудову системоаналогового керування $\overline{u}(t,A)$ та $u(t,A)$ виконувати неперервно для поточного стану $x(t)$ об'єкта керування, то системоаналогове керування буде еквівалентне дії керування із зворотним зв'язком виду (11).

Методика багатокритеріального синтезу системоаналогового керування із зворотним зв'язком полягає в наступному.

На першому етапі синтезу задаються аналітичною структурою адаптивного програмного керування $\overline{u}(t,A)$ та $u(t,A)$, де $A = (a_1,\ a_2,\ldots,a_N)$ – вектор вільних параметрів, що підлягає визначенню. Системоаналогове керування $\overline{u}(t,A)$ та $u(t,A)$ переводимо в область зображень зміщеними перетвореннями (7) та (8):

$$U(k,t_\nu,A)=\frac{H_1^k}{k!}\left[\frac{d^k u(t_\nu+\tau)}{d\tau^k}\right]_{\tau=0}, \tag{12}$$

$$\overline{U}(k,t_v,A)=\frac{(-H_2)^k}{k!}\left[\frac{d^k u(t_v-\tau)}{d\tau^k}\right]_{\tau=0} . \qquad (13)$$

На другому етапі, використовуючи зміщені перетворення (7) та (8), формують системоаналогову модель диференційного рівняння (1):

$$X(k+1,t_v,x_v,A)=\frac{H_1}{k+1}F[T_c(k,t_v),X(k,t_v,x_v,A),U(k,t_v,A)] , \qquad (14)$$

$$\overline{X}(k+1,t_v,x_v,A)=-\frac{H_2}{k+1}F[\overline{T}_c(k,t_v),\overline{X}(k,t_v,x_v,A),\overline{U}(k,t_v,A)] , \qquad (15)$$

$$\overline{X}(0)=X(0)=x(t_v)=x_v,\ H_1=T-t_v,\ H_2=t_v-t_0 ,$$

де F – зображення оригіналу функції f; $T_c(k,t_v)$ – зображення часового аргументу $t = t_v + \tau$, $\overline{T}_c(k,t_v)$ – зображення часового аргументу $t = t_v - \tau$, що змінюється в зворотному напрямку.

Системоаналогова модель (14) і (15) із врахуванням виразів (12), (13) дозволяє, послідовно надаючи цілочисельні значення аргументу k = 0, 1, 2, 3,..., визначити дискрети диференційних спектрів $X(k,t_v,x_v,A)$ та $\overline{X}(k,t_v,x_v,A)$ від початкових умов $X(0)=\overline{X}(0)=x_v$.

На третьому етапі, підставляючи дискрети $X(k,t_v,x_v,A)$ та $\overline{X}(k,t_v,x_v,A)$ в обернені перетворення (9) та (10), одержуємо вирази для граничних значень розв'язку рівняння (1):

$$x(t_0)=x_0=\sum_{k=0}^{\infty}\overline{X}(k,t_v,x_v,A) , \qquad (16)$$

$$x(T)=x(T,x_v,A)=\sum_{k=0}^{\infty}X(k,t_v,x_v,A) . \qquad (17)$$

Вираз (17) підставляємо в (2) і перетворюємо (16) в форму рівняння. В результаті отримаємо два векторних обмеження у формі рівностей:

$$S[x(T,x_v,A),T]=0 , \qquad (18)$$

$$x_0-\sum_{k=0}^{\infty}\overline{X}(k,t_v,x_v,A)=0 . \qquad (19)$$

Векторне рівняння (18) має розмірність q, а рівняння (19) – n.

На четвертому етапі часткові критерії (3) при $v = 0$ виражаємо через дискрети диференційних спектрів (12)–(15). Спочатку підставляємо вираз (18) в першу складову часткових критеріїв (3) і одержуємо функцію виду:

$$G_j[x(T,t_v,x_v,A),T],\ j=\overline{1,r} . \qquad (20)$$

Інтегральні складові часткових критеріїв перетворюємо наступним чином. Інтервал інтегрування $[t_0,\ T]$ розбиваємо на два інтервали $[t_0,\ t_v]$ та $[t_v,\ T]$ і підінтегральні функції $\varphi_j(x,u),\ j=\overline{1,r}$ на цих інтервалах переводимо в область зображень відповідно диференційними перетвореннями (7) та (8). В результаті функціонали (3) перетворюються у функції вигляду:

$$\begin{aligned}I_j(T,t_v,x_v,A)&=G_j[x(T,t_v,x_v,A),T]+H_1\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{k+1}\Phi_j[T_c(k,t_v),X(k,t_v,x_v,A),U(k,t_v,A)]+\\&+H_2\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{k+1}\Phi_j[\overline{T}_c(k,t_v),\overline{X}(k,t_v,x_v,A),\overline{U}(k,t_v,A)],\ j=\overline{1,r},\end{aligned} \qquad (21)$$

де $H_1 = T - t_v$, $H_2 = t_v - t_0$; Φ_j – зображення функції φ_j.

На п'ятому етапі задачу багатокритеріальної оптимізації (1)–(4) у випадку застосування скалярної згортки (5) і зміщених диференційних перетворень (7)–(10) перетворюємо в задачу оптимізації функції багатьох змінних

$$J(T,t_v,x_v,A)=\sum_{j=1}^{r}\frac{\alpha_j}{\left[1-\dfrac{I_j(T,t_v,x_v,A)}{I_{jm}}\right]^{\beta_j}} \qquad (22)$$

при обмеженнях в формі рівностей (18), (19). Якщо використати скалярну згортку (6), задача багатокритеріальної оптимізації (1)–(4) зводиться до оптимізації функції виду

$$\bar{J}(T,t_v,x_v,A)=\sum_{j=1}^{r}\frac{1}{1-\frac{I_j(T,t_v,x_v,A)}{I_{jm}}} \tag{23}$$

при умовах (18), (19).

Задачу оптимізації функції (22) або (23) з обмеженнями в формі рівностей (18), (19) розв'язуємо методом множників Лагранжа [6]. Попередньо введемо векторну функцію $\Psi=(\Psi_1, \Psi_2,\dots, \Psi_n)$, що визначається виразом (19):

$$\Psi(t_v,x_v,A,x_0)=x_0-\sum_{k=0}^{\infty}\bar{X}(k,t_v,x_v,A)=0\,. \tag{24}$$

Функція (22) і умови (24), (18) об'єднуються множниками Лагранжа $\lambda_x=(\lambda_{x_1},\lambda_{x_2},\dots,\lambda_{x_n})$ та $\lambda_s=(\lambda_{s_1},\lambda_{s_2},\dots,\lambda_{s_q})$ в нову функцію:

$$J^*(T,x_v,A,\lambda_x,\lambda_s,x_0)=J(T,t_v,x_v,A)+\sum_{i=1}^{n}\lambda_{x_i}\Psi_i(t_v,x_v,A,x_0)+\sum_{j=1}^{q}\lambda_{s_j}S_j[x(T,x_v,A),T]\,. \tag{25}$$

У випадку оптимізації функції (23) вона об'єднується з умовами (24), (18) множниками Лагранжа $\bar{\lambda}_x=(\bar{\lambda}_{x_1},\bar{\lambda}_{x_2},\dots,\bar{\lambda}_{x_n})$ та $\bar{\lambda}_s=(\bar{\lambda}_{s_1},\bar{\lambda}_{s_2},\dots,\bar{\lambda}_{s_q})$ у функцію виду:

$$\bar{J}^*(T,x_v,A,\lambda_x,\lambda_s,x_0)=\bar{J}(T,t_v,x_v,A)+\sum_{i=1}^{n}\bar{\lambda}_{x_i}\Psi_i(t_v,x_v,A,x_0)+\sum_{j=1}^{q}\bar{\lambda}_{s_j}S_j[x(T,x_v,A),T]\,. \tag{26}$$

Необхідні умови екстремуму функції (25) складають систему кінцевих рівнянь для визначення векторів $A,x_v,\lambda_x,\lambda_s$ і граничного значення часу T при довільному початковому стані $x(t_0)=x_0$:

$$\begin{gathered}\frac{\partial J^*(T,x_v,A,\lambda_x,\lambda_s,x_0)}{\partial T}=0;\ \frac{\partial J^*(T,x_v,A,\lambda_x,\lambda_s,x_0)}{\partial x_{v_i}}=0;\ \frac{\partial J^*(T,x_v,A,\lambda_x,\lambda_s,x_0)}{\partial a_j};\\ \frac{\partial J^*(T,x_v,A,\lambda_x,\lambda_s,x_0)}{\partial \lambda_{x_i}}=0;\ \frac{\partial J^*(T,x_v,A,\lambda_x,\lambda_s,x_0)}{\partial \lambda_{s_l}}=0;\ i=\overline{1,n};\ j=\overline{1,N};\ l=\overline{1,q}.\end{gathered} \tag{27}$$

Аналогічно, необхідні умови екстремуму функції (26) складають систему:

$$\begin{gathered}\frac{\partial \bar{J}^*(T,x_v,A,\bar{\lambda}_x,\bar{\lambda}_s,x_0)}{\partial T}=0;\ \frac{\partial \bar{J}^*(T,x_v,A,\bar{\lambda}_x,\bar{\lambda}_s,x_0)}{\partial x_{v_i}}=0;\ \frac{\partial \bar{J}^*(T,x_v,A,\bar{\lambda}_x,\bar{\lambda}_s,x_0)}{\partial a_j};\\ \frac{\partial \bar{J}^*(T,x_v,A,\bar{\lambda}_x,\bar{\lambda}_s,x_0)}{\partial \bar{\lambda}_{x_i}}=0;\ \frac{\partial \bar{J}^*(T,x_v,A,\bar{\lambda}_x,\bar{\lambda}_s,x_0)}{\partial \bar{\lambda}_{s_l}}=0;\ i=\overline{1,n};\ j=\overline{1,N};\ l=\overline{1,q}.\end{gathered} \tag{28}$$

Якщо достатні умови мінімуму або максимуму функції (22) чи (23) виконуються [6], то неперервний розв'язок системи кінцевих рівнянь (27) або (28) відповідно в реальному часі дозволяє знайти вектор A у вигляді $A[T,\ x(t)]$, де довільний початковий стан $x(t_0)$ приймається рівним поточному стану $x(t)$. Підстановка розв'язків $A(T,\ x)$ системи кінцевих рівнянь (27) або (28) в обрану аналітичну структуру системоаналогового адаптивного керування $\bar{u}[t,A(T,x)]$ та $u[t,A(T,x)]$ визначає багатокритеріальне керування із зворотним зв'язком вигляду (11), що здатне адаптуватися до дії вектора збурень $v(t)$.

Переваги застосування зміщених диференційних перетворень у порівнянні з основними проявляються в багатокритеріальних задачах синтезу оптимального керування, що діє на значних інтервалах часу $[t_0,\ T]$. В цьому випадку застосування основних диференційних перетворень потребує розбиття часового інтервалу $[t_0,\ T]$ на L підінтервалів [4]. Застосування зміщених диференційних перетворень для синтезу оптимального керування вдвічі зменшує кількість підінтервалів розбиття інтервалу $[t_0,\ T]$ при умові отримання однакової точності з основними перетвореннями.

У випадку, коли в задачах багатокритеріальної оптимізації потреба високої точності вимагає врахування значного числа дискрет диференційного спектра вектора керування u, а розмірність n вектора стану $x(t)$ невелика $(1 \le n \le 3)$, зміщені диференційні перетворення дозволяють зменшити розмірність вектора вільних параметрів $A(T,\ x)$ і цим скоротити розмірність системи кінцевих рівнянь (27) або (28) при умові однакової точності з основними перетвореннями.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Попов Н.М.* Об оценке вычислительной сложности многокритериальной оптимизации // Вычислительные комплексы и моделирование сложных систем. – М., 1989. – С. 142–152.
2. *Баранов В.Л., Залогин Н.С., Уруский О.С. и др.* Квазианалоговые многокритериальные модели оптимизации динамических процессов // Электрон. моделирование. – 1996. – 18, № 1. – С. 3–9.
3. *Воронин А.Н.* Многокритериальный синтез динамических систем. – Киев: Наук. думка, 1992. – 160 с.
4. *Пухов Г.Е.* Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т-преобразований. – Киев: Наук. думка, 1988. – 216 с.
5. *Козлов А.И.* Об унимодальности нелинейной схемы компромиссов // Автоматика. – 1993. – № 4. – С. 81–85.
6. *Брайсон А., Хо Ю-Ши* Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, – 1972. – 544 с.

ФРОЛОВА Олена Геннадіївна – аспірантка Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.

Наукові інтереси:
- моделювання;
- оптимізація;
- диференціальні перстворення.

Тел.: (044)450-41-99.
E-mail: frolov@alfacom.net

Подано 20.09.2002