УДК 681.51:519.71

Тимченко В. Л.[1], Кондратенко Ю. П.[2]

[1]Канд. техн. наук, доцент Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев
[2]Д-р техн. наук, профессор Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев

СИНТЕЗ СТРУКТУРНО ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

В статье рассматривается применение метода структурно переключаемых обратных связей для синтеза управляющих функций в замкнутых системах управления многомерными подвижными объектами. Сформированы принципы построения оптимальной траектории движения объекта и определения моментов переключения управляющих функций в цепях обратных связей, получены значения вектора управления для замкнутых систем различного типа.

Ключевые слова: многомерные подвижные объекты, структурно переключаемые обратные связи, замкнутые системы управления.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из базовых принципов синтеза систем управления подвижными объектами являются подходы, основанные на решении обратных задач динамики (ОЗД) объектов управления, т. к. динамика подвижных объектов, например, морских подвижных объектов, достаточно исследована и, таким образом, на базе математической модели установлена структурно-параметрическая связь между фазовыми координатами объекта, что позволяет максимально использовать это знание при синтезе управления.

ОЗД формировались и решались еще У. Гамильтоном, Ж. Лагранжем в задачах аналитической механики, позже в работах по механике управляемого полета и других приложениях Н. Еругина, А. Галиуллина, а также в работах последнего времени при синтезе систем с обратными связями [1, 2]. Систематизировано и детально рассмотрено решение ОЗД управляемых систем в работах [3, 4] для линейных и нелинейных моделей, в т. ч. при синтезе робастно устойчивых структур управляемых систем высокой динамической точности [5].

При всем многообразии требований, которые предъявляются к системам управления, можно при одинаковых требованиях к точности управления выделить два основных физических качества – минимум расхода энергии при управлении и максимальное быстродействие для переходного процесса управления [6]. Эти требования, естественно, являются экстремальными, а система, которая отвечает им, классически оптимальна в том смысле, как это определяется с момента возникновения теории оптимального управления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для класса подвижных объектов наибольший интерес представляет создание инженерных методов исследования показателей качества многомерных динамических моделей и синтеза оптимальных управляющих воздействий. Аналитическое решение краевых задач при использовании классических методов оптимального управления с учетом многомерности объекта управления сложно и громоздко, а численное решение в ряде случаев не дает достаточно быстрой сходимости. В этой связи существует потребность в развитии инженерных методов оптимального управления, которые не нуждаются в непосредственном решении дифференциальных уравнений динамики объекта.

Метод структурно переключаемых обратных связей [7–9] позволяет решать практические задачи построения оптимальной траектории движения для разных критериев оптимальности и вида граничных условий. При этом движение по отрезкам оптимальной траектории обеспечивается управляющими функциями в цепях обратной связи, которые имеют возможность переключения для перехода с текущего отрезка траектории движения на заданный отрезок.

Данный метод состоит из следующих основных этапов [7]:

– планирование оптимальной траектории;

– определение моментов переключения управляющих функций в цепях обратной связи объекта;

– синтез управляющих функций в соответствующих цепях обратной связи многомерного объекта.

Планирование траектории перехода объекта для заданных критериев (условий) оптимальности и граничных условий заключается в определении необходимого количества отрезков траектории с постоянными значениями соответствующих производных фазовых переменных, а также моментов времени переключения управляющих функций в цепях обратных связей при переходе с начального отрезка на заданный отрезок траектории. Переключение управляющих функций изменяет структурную конфигурацию обратных связей и решает задачу обеспечения необходимого порядка производной фазовой переменной с соответствующим позитивным или негативным постоянным значением. Синтез управляющих функций при этом будет заключаться в определении управляющих воздействий в цепях обратных связей объекта управления, при которых на определенных отрезках фазовой траектории выполняются условия постоянства соответствующих производных фазовых переменных. Произвольную фазовую траекторию объекта управления можно описать как совокупность отрезков траектории с постоянной производной определенного порядка. Планирование фазовой траектории объекта управления для заданных начальных и конечных условий включает определение необходимого количества отрезков фазовой траектории с постоянными значениями соответствующих производных вектора фазовых координат, а также вычисление моментов переключения управлений в обратных связях.

Целью данной статьи является разработка методов решения задач, стоящих перед перечисленными выше этапами синтеза замкнутых систем управления многомерными подвижными объектами.

Для i-го отрезка фазовой траектории произвольного (в т. ч. нелинейного, нестационарного) динамического объекта запишем, применяя разложение в ряд Тейлора,

$$\begin{aligned}\mathbf{X}(t_{i+1}) = \mathbf{X}(t_i) + \frac{d\mathbf{X}(t)}{dt}\Big|_{t_i^l}\frac{\Delta t^l}{1!} + \ldots + \\ + \frac{d^k\mathbf{X}(t)}{dt^k}\Big|_{t_i^l}\frac{(\Delta t^l)^k}{k!} + \ldots + \mathbf{R}_p,\end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{X}(t) = \{x_x(t); x_y(t); x_z(t)\}$ – вектор фазовых координат движения по координатным осям $l = \{x, y, z\}$; $\mathbf{R}_p$ – вектор, определяющий остаточные члены ряда Тейлора; $\Delta t^l = t_{i+1}^l - t_i^l$; t_i^l, t_{i+1} – начальный и конечный моменты времени движения объекта по каждой из координатных осей на i-м отрезке траектории.

Планирование фазовой траектории объекта управления для, соответственно, начальных и конечных условий

$$\left\{x_{ox}, x_{oy}, x_{oz}; \dot{x}_{ox}, \dot{x}_{oy}, \dot{x}_{oz}; \ldots; \overset{(k)}{x}_{ox}, \overset{(k)}{x}_{oy}, \overset{(k)}{x}_{oz},\right\};$$

$$\left\{x_{fx}, x_{fy}, x_{fz}; \dot{x}_{fx}, \dot{x}_{fy}, \dot{x}_{fz}; \ldots; \overset{(m)}{x}_{fx}, \overset{(m)}{x}_{fy}, \overset{(m)}{x}_{fz}\right\}$$

заключается в определении необходимого количества отрезков фазовой траектории с постоянными значениями соответствующих производных вектора $\mathbf{X}(t)$, а также моментов времени t_i^l переключения управляющих функций в обратных связях для обеспечения перехода объекта с данного отрезка траектории на последующий отрезок по каждой из координатных осей $l = \{x, y, z\}$.

Синтез оптимальных управляющих функций для многомерного объекта с применением метода структурно переключаемых обратных связей рассмотрим на примере задачи управления с минимумом расхода энергии. Рассмотрим уравнения движения динамического объекта на горизонтальной плоскости при равных граничных условиях по двум возможным фазовым траекториям:

$$\mathbf{X}(T_1) = \mathbf{X}(0) + \dot{\mathbf{X}}(0)T_1 + \ddot{\mathbf{X}}(0)\frac{T_1^2}{2!} + \ldots + \overset{(m)}{\mathbf{X}}(0)\frac{T_1^m}{m!}, \quad (2)$$

$$\mathbf{X}(T_2) = \mathbf{X}(0) + \dot{\mathbf{X}}(0)T_2 + \ddot{\mathbf{X}}(0)\frac{T_2^2}{2!} + \ldots + \overset{(r)}{\mathbf{X}}(0)\frac{T_2^r}{r!}, \quad (3)$$

где $\mathbf{X}(0)$, $\mathbf{X}(T_1) = \mathbf{X}(T_2)$ – векторы начальных и конечных координат; T_1, T_2 – время движения по каждой из траекторий; m, r – порядок высших производных вектора фазовых координат.

Оценка кинетической энергии, затраченной на движение, показывает, что для траектории, определяемой уравнением (3), при выполнении условия $m > r$ расход энергии меньший по сравнению с траекторией (2). При этом в случае $(m - r) = 1$ разница кинетических энергий $\Delta E = \min$, а с ростом $(m - r)$ величина ΔE будет также возрастать. Последующий анализ показывает, что оптимальной по минимуму расхода энергии является траектория с наименьшим количеством минимальных по амплитуде производных фазовых переменных, необходимых для выполнения всех граничных условий.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ В ЦЕПЯХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Переключение управляющих функций обеспечивает требуемый порядок производной фазовой координаты с соответствующим положительным или отрицательным постоянным значением. Синтез управляющих функций будет состоять в определении управляющих воздействий в цепях обратных связей объекта управления, при которых на определенных заданных отрезках фазовой траектории выполняются условия постоянства соответствующих производных фазовой переменной $\mathbf{X}(t)$. Таким образом, при движении по координатным осям $l = \{x, y, z\}$ на каждом отрезке фазовой траектории будет включаться на определенное время Δt^l соответствующая цепь обратной связи, реализующая заданную управляющую функцию.

Моменты переключения управляющих функций в обратной связи будут определяться на основе энергетического анализа (гамильтониана системы), вида планируемых фазовых траекторий с учетом ограничений на управляющее воздействие, необходимых условий оптимальности и заданных граничных условий.

В общем виде процесс управления можно разбить на этапы «разгона» и «торможения» до заданных параметров, например, постоянной скорости движения.

Фазовые уравнения процесса «разгона» до заданной скорости $\dot{\mathbf{X}}(t_{i+1})$ с последующим движением объекта управления с ее постоянным значением $\dot{\mathbf{X}}(t_{i+1}) = \text{const}$ до момента времени $(t_i + 2)$ запишем в виде

$$\mathbf{X}(t_1) = \mathbf{X}(0) + \dot{\mathbf{X}}(0)t_1 + \ddot{\mathbf{X}}(0)\frac{t_1^2}{2} + \ldots + \overset{(k)}{\mathbf{X}}(0)\frac{t_1^k}{k!};$$

....

$$\mathbf{X}(t_{i+1}) = \mathbf{X}(t_i) + \dot{\mathbf{X}}(t_i)(t_{i+1} - t_i) + \ddot{\mathbf{X}}(t_i)\frac{(t_{i+1} - t_i)^2}{2};$$

$$\mathbf{X}(t_{i+2}) = \mathbf{X}(t_{i+1}) + \dot{\mathbf{X}}(t_{i+1})(t_{i+2} - t_{i+1}).$$

Уравнения этапа «торможения» от постоянной скорости $\dot{\mathbf{X}}(t_{i+1}) = \text{const}$ до нового (заданного) значения скорости $\dot{\mathbf{X}}(t_m) = \text{const}$ будут иметь вид

$$\mathbf{X}(t_{i+3}) = \mathbf{X}(t_{i+2}) + \dot{\mathbf{X}}(t_{i+2})(t_{i+3} - t_{i+2}) - \ldots - \overset{(k)}{\mathbf{X}}(t_{i+2})\frac{(t_{i+3} - t_{i+2})^k}{k!};$$

....

$$\mathbf{X}(t_m) = \mathbf{X}(t_{m-1}) + \dot{\mathbf{X}}(t_{m-1})(t_m - t_{m-1}) - \ddot{\mathbf{X}}(t_{m-1})\frac{(t_m - t_{m-1})^2}{2};$$

$$\mathbf{X}(t_{m+1}) = \mathbf{X}(t_m) + \dot{\mathbf{X}}(t_m)(t_{m+1} - t_m).$$

При этом t_i – моменты переключения управляющих функций в цепях обратных связей ($i = 1, \ldots, m$).

СИНТЕЗ СТРУКТУРНО ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Общий порядок синтеза структурно переключаемых систем на основе обратных связей рассмотрен в работах [7, 8]. В данной статье предложенный подход расширяется для замкнутых систем различного вида. При этом обратная связь, замыкающая систему, будет являться главной, а формируемые на основе предложенного метода структурно переключаемые обратные связи – дополнительными. Для управляемой системы (рис. 1), замкнутой единичной обратной связью, динамика описывается векторно-матричным уравнением вида

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}[\mathbf{U}(t) - \mathbf{X}(t)] = (\mathbf{A} - \mathbf{B})\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t). \quad (4)$$

После дифференцирования уравнения (4) получим вторую производную

$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B})\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t), \quad (5)$$

а после повторения процедуры дифференцирования – третью производную

$$\dddot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B})\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t). \quad (6)$$

Для траектории вида (2) при $\dddot{\mathbf{X}}(t) = 0$ после подстановки последовательно уравнения (4) в (5) и дальше в (6) получим уравнение

$$\mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) = -(\mathbf{A} - \mathbf{B})^3\mathbf{X}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{B})^2\mathbf{B}\mathbf{U}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{B})\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t). \quad (7)$$

После использования преобразования Лапласа с учетом начального значения вектора управляющих функций $\mathbf{U}_0$ и векторно-матричных преобразований получаем

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}[p^2\mathbf{E} + p(\mathbf{A} - \mathbf{B}) + (\mathbf{A} - \mathbf{B})^2]^{-1} \times \{(\mathbf{A} - \mathbf{B})^3\mathbf{X}(p) - (p\mathbf{B} + [(\mathbf{A} - \mathbf{B})\mathbf{B}]\mathbf{U}_0 + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}_0)\}.$$

Для случая, когда обратная связь не является единичной, а описывается матрицей постоянных пара-

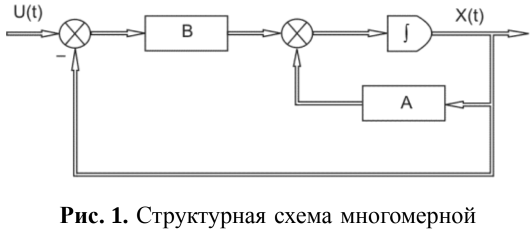

Рис. 1. Структурная схема многомерной замкнутой системы

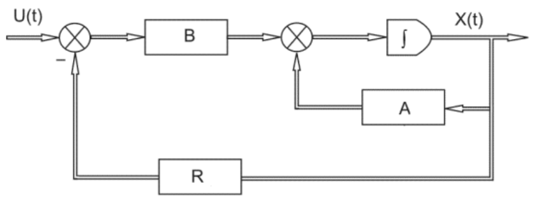

Рис. 2. Структурная схема замкнутой многомерной системы с обратной связью, описываемой матрицей **R**

метров **R** (рис. 2), векторно-матричное уравнение (4) запишется в виде

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{X}(t) + \mathbf{BU}(t). \tag{8}$$

Дифференцирование уравнения (8) дает уравнение управляемой системы для траектории движения объекта вида (2) с учетом выполнения условия $\ddot{\mathbf{X}}(t) = 0$

$$\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) = -(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{X}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{BU}(t).$$

При использовании преобразования Лапласа с учетом начального значения вектора управляющих функций $\mathbf{U}_0$ запишем для вектора управлений:

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}(p\mathbf{E} + \mathbf{A} - \mathbf{BR})^{-1} \times \\ \times[(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{X}(p) - \mathbf{BU_0}].$$

После повторения процедуры дифференцирования (8) получим уравнение динамики при $\dddot{\mathbf{X}}(t) = 0$:

$$\mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) = -(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^3\mathbf{X}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{BU}(t) - \\ -(\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t);$$

а также, с использованием необходимых преобразований, выражение для вектора управлений:

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}[p^2\mathbf{E} + p(\mathbf{A} - \mathbf{BR}) + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2]^{-1} \times \\ \times\{(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^3\mathbf{X}(p) - [p\mathbf{B} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}]\mathbf{U_0} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}_\mathbf{0})\}.$$

В случае переменной обратной связи динамическая система (8) становится нестационарной вида

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{AX}(t) + \mathbf{B}[\mathbf{U}(t) - \mathbf{R}(t)\mathbf{X}(t)] = \\ = [\mathbf{A} - \mathbf{BR}(t)]\mathbf{X}(t) + \mathbf{BU}(t), \tag{9}$$

т. к. матрица $\mathbf{R}(t)$ будет включать компоненты, которые являются функциями времени. Проведем дифференцирование уравнения (9) и получим, например, для второй производной

$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = [-\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2]\mathbf{X}(t) + \\ +(\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{BU}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t). \tag{10}$$

Далее для третьей производной запишем

$$\dddot{\mathbf{X}}(t) = [-\mathbf{B}\ddot{\mathbf{R}} - 2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}(\mathbf{A} - \mathbf{BR}) - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} + \\ +(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^3]\mathbf{X}(t) + [-2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{B}]\mathbf{U}(t) + \\ +(\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t). \tag{11}$$

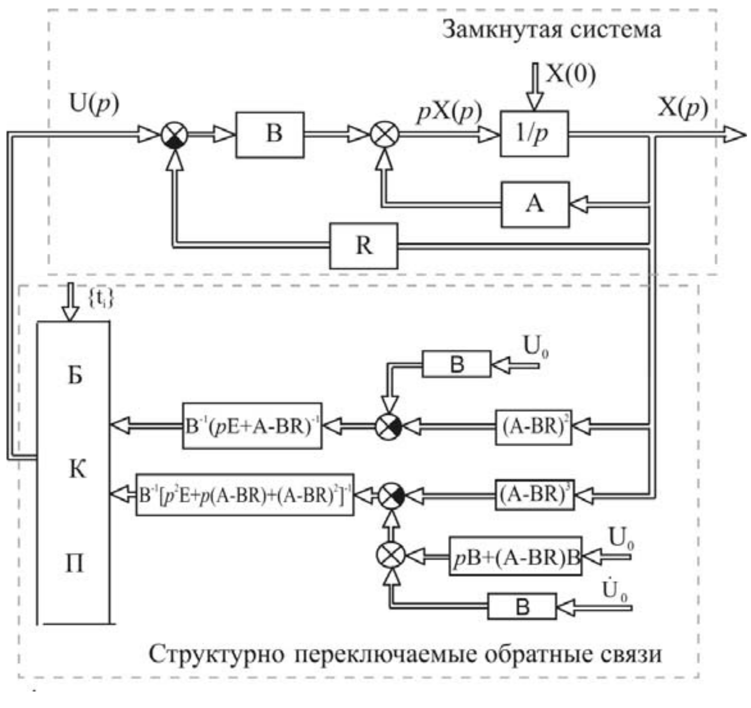

Рис. 3. Структурная схема системы управления вида (8) с дополнительными обратными связями (БКП – блок ключей переключения)

При выполнении условия $\ddot{\mathbf{X}} = 0$ будем иметь из (11)

$$[-2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2]\mathbf{BU}(t) + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) = \\ = [\mathbf{B}\ddot{\mathbf{R}} + 2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}(\mathbf{A} - \mathbf{BR}) + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^3]\mathbf{X}(t). \quad (12)$$

Для квазистационарных объектов с медленно изменяющимися параметрами примем, что $\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_{\Delta t_c}$, $\dot{\mathbf{R}}(t) = \dot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c}$, $\ddot{\mathbf{R}}(t) = \ddot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c}$ есть матрицы, компоненты которых известны, постоянны («заморожены» [9] на интервале Δt_c) и независимы для определенного интервала времени Δt_c. Тогда, применяя преобразование Лапласа, получим из уравнения (10) для вектора управления $\mathbf{U}(p)$ при выполнении условия $\ddot{\mathbf{X}}(t) = 0$ с учетом нулевых начальных значений

$$\mathbf{U}(p) = -[p\mathbf{B} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c})\mathbf{B}]^{-1} \times \\ \times[-\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c})^2]\mathbf{X}(p).$$

Решение преобразованного уравнения (12) относительно $\mathbf{U}(p)$ определяет выражение вектора управляющих функций для выполнения условия $\dddot{\mathbf{X}} = 0$

$$\mathbf{U}(p) = \{p^2\mathbf{B} + p(\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c})\mathbf{B} - \\ -[2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c} - (\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c})^2]\mathbf{B}\}^{-1} \times \\ \times[\mathbf{B}\ddot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c} + 2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c}(\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c}) + \\ + (\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c})\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c} - (\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c})^3]\mathbf{X}(p).$$

Для случая, когда на вход стационарной системы (рис. 4) подается вектор наблюдаемых координат **Y**, будем иметь векторно-матричное уравнение системы

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BC})\mathbf{X}(t) + (\mathbf{B} - \mathbf{BD})\mathbf{U}(t).$$

В результате соответствующих векторно-матричных преобразований вектор управляющих функций $\mathbf{U}(p)$ при условии $\overset{(k)}{\mathbf{X}}(t) = 0$ запишется в виде

$$\mathbf{U}(p) = -(\mathbf{B} - \mathbf{BD})^{-1}(p^{k-1}\mathbf{E} + \mathbf{A_k})^{-1} \times \\ \times[\mathbf{A} - \mathbf{BC})^k\mathbf{X}(p) - \mathbf{U_0}(p)], \quad (13)$$

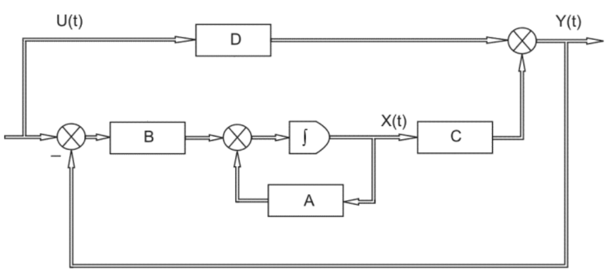

Рис. 4. Структурная схема многомерной системы управления с обратной связью по вектору выходных (наблюдаемых) координат

где матрица $\mathbf{A_k} = \sum_{j=0}^{k-2}(p^j\mathbf{A} - \mathbf{BC})^{k-j-1}$; $\mathbf{U}_0(p)$ – начальный вектор управляющей функции.

При обратной связи, которая включает матрицу параметров **R**, будем иметь уравнение (13) в виде

$$\mathbf{U}(p) = -(\mathbf{B} - \mathbf{BRD})^{-1}(p^{k-1}\mathbf{E} + \mathbf{A_k})^{-1} \times \\ \times[(\mathbf{A} - \mathbf{BRC})^k\mathbf{X}(p) - \mathbf{U_0}(p)].$$

При переменной обратной связи $\mathbf{R}(t)$ динамика управляемой системы примет вид

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = [\mathbf{A} - \mathbf{BR}(t)\mathbf{C}]\mathbf{X}(t) + [\mathbf{B} - \mathbf{BR}(t)\mathbf{D}]\mathbf{U}(t). \quad (14)$$

Преобразование уравнения (14) для квазистационарной системы аналогично (10) и решение относительно $\mathbf{U}(p)$ определяют выражение вектора управляющих функций при условии $\ddot{\mathbf{X}}(t) = 0$

$$\mathbf{U}(p) = \{p(\mathbf{B} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c}\mathbf{D}) + \\ + [(\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c}\mathbf{C})(\mathbf{B} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c}\mathbf{D}) - \mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c}\mathbf{D}]\}^{-1} \times \\ \times[\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}_{\Delta t_c}\mathbf{C} - (\mathbf{A} - \mathbf{BR}_{\Delta t_c}\mathbf{C})^2]\mathbf{X}(p).$$

Полученные значения управляющих функций дают возможность для разных типов динамических систем обеспечить движение многомерного объекта по заданной оптимальной траектории движения.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод структурно переключаемых обратных связей для синтеза управляющих воздействий позволяет для широкого класса многомерных подвижных объектов решать практические задачи построения оптимальных фазовых траекторий для различных условий оптимальности движения и вида граничных условий**.** Данный подход не требует непосредственного измерения производных фазовых переменных на выходе объекта управления, а определение моментов переключения управляющих функций осуществляется путем решения системы алгебраических уравнений. Полученные решения для вектора управляющих функций замкнутых систем различного типа обеспечивают движение многомерного подвижного объекта по оптимальным траекториям. Результаты реализации предложенного подхода для синтеза систем управления широким классом динамических объектов [10, 11], в том числе морских подвижных объектов, при решении задач их стабилизации в условиях ограниченных акваторий подтверждают работоспособность и эффективность применения метода структурно переключаемых обратных связей в замкнутых системах управления различного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Габасов, Р.* Реализация ограниченной обратной связи в нелинейной задачей регулирования / Р. Габасов, Ф. М. Кириллова, Е. А. Ружицкая // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – № 1 – С. 108–116.
2. *Ларин, В. Б.* Стабилизация системы обратной связью по выходной переменной / В. Б. Ларин // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С. 5–18.
3. *Крутько, П. Д.* Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П. Д. Крутько – М. : Машиностроение, 2004. – 576 с.
4. *Krutko, P. D.* Symmetry and inverse problems of control system dynamics / P. D. Krutko // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 6. – С. 17–46.
5. *Крутько, П. Д.* Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов / П. Д. Крутько // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 2. – С. 120–140.
6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского – М. : Наука, 1987. – 711 с.
7. *Тимченко, В. Л.* Оптимальное управление линейным объектом на основе метода структурно-переключаемых обратных связей // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Інформатика та моделювання». – 2009. – № 13. – С. 167–176.
8. *Тимченко, В. Л.* Синтез оптимальных структурно-переключаемых систем управления многомерным объектом под воздействием возмущений / В. Л. Тимченко // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». Ч. 1. – Інститут електродинаміки НАНУ, Київ. 2010. – С. 77–81.
9. *Солодов, А. В.* Линейные автоматические системы с переменными параметрами / А. В. Солодов, Ф. С. Петров. – М. : Наука, 1971. – 620 с.
10. Патент 53614 Україна МПК (2009) G05B 11/01. Спосіб керування багатовимірним динамічним об'єктом / Тимченко В. Л., Кондратенко Ю. П., Кукліна К. О. ; власник патенту Національний університет кораблебудування. – № u201004692; заявл. 20.04.2010; надрук. 11.10.2010. Бюл. № 3.
11. Патент 57100 Україна МПК (2011.01) G05B 11/01. Спосіб робастного керування багатовимірним динамічним об'єктом / Тимченко В. Л., Кондратенко Ю. П., Кукліна К. О. ; власник патенту Національний університет кораблебудування. – № u201008990; заявл. 19.07.2010; надрук. 10.02.2011. Бюл. № 19.

Надійшла 4.11.2010

Тимченко В. Л., Кондратенко Ю. П.

СИНТЕЗ СТРУКТУРНО ПЕРЕМИКАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БАГАТОВИМІРНИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

У статті розглядається застосування методу структурно перемикальних зворотних зв'язків до синтезу замкнених систем керування багатовимірними рухомими об'єктами. Сформовано принципи побудови оптимальних траєкторій руху об'єктів і визначення моментів перемикання керуючих функцій в ланцюгах зворотних зв'язків, отримано значення вектора керувань для замкнених систем різного типу.

Ключові слова: багатовимірні рухо мі об'єкти, структурно перемикальні зворотні зв'язки, замкнені системи керування.

Tymchenko V. L., Kondratenko Y. P.

SYNTHESIS OF STRUCTURALLY COMMUTED SYSTEMS FOR MULTIDIMENSIONAL MOVING OBJECTS CONTROL

The authors apply the method of structurally commuted feedbacks for controlling functions synthesis in closed loop systems of multidimensional moving objects control. The principles of optimal object trajectory construction and determination of controlling functions switching moments in feedback circuits are formulated; the values of control vector are obtained for different types of closed loop systems.

Key words: multidimensional moving objects, structurally commuted feedbacks, closed loop control systems.