

УДК 531.36; 62-50

**П.Г. Яковенко****СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ПОДВИЖНЫМИ  
ОБЪЕКТАМИ ВО ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ****Введение**

Синтез оптимальных по быстродействию управлений линейными и нелинейными системами с ограничением координат традиционными методами не всегда эффективен. Следует применять новые, нестандартные подходы, в которых требуется не столько искусство математика, сколько хорошее знание рассматриваемой технической задачи и понимание, какими факторами можно пренебречь и к каким последствиям это приведет.

Для технических систем характерна иерархия вышестоящего и нижестоящего уровней. Продвижение к глобальной цели обычно осуществляется за счет соответствующей координации деятельности подсистем. Глобальная цель разветвляется в подцели, причем, часто лишь после достижения подцели появляется возможность оценить целесообразность принятия того или иного закона управления. Такие действия следует выполнять путем прогнозирования. Метод избыточных переменных применим для синтеза оптимальных управлений подвижными объектами с учетом нелинейностей и ограничений координат.

**Методика последовательного синтеза оптимальных управлений**

В сложных системах наблюдается иерархическая система противоречий, которую следует использовать для создания алгоритмов управления. Имитационное моделирование позволяет постичь суть явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте. Обычно модель будущего состояния системы составляется с учетом того, что происходит на промежуточных этапах. Необходимо сравнивать последствия возможных шагов, не выполняя их реально.

Новые методики синтеза оптимальных управлений могут быть созданы на основе методов динамического программирования [1] и имитационного моделирования, принципов «перемены цели» и «ведущего слабого звена» [2]. На моделях возможен поиск управлений путем исследования переходных процессов в системе, получаемых в результате приложения пробных воздействий.

Принцип «перемены цели» служит в качестве средства приспособления системы к изменению параметров, фазовых координат, ограничений и требований к переходным процессам. Принцип «ведущего слабого звена» подразумевает объединение слабых и сильных звеньев для достижения цели причем сильные звенья, имеющие большие адаптационные возможности, подстраиваются под слабые звенья. В течение переходного процесса главными на разных этапах становятся разные ограничения и требования, причем, некоторые ограничения могут и не стать главными для конкретного процесса и не участвовать в формировании оптимального управления. Наличие в любой момент времени переходного процесса одного «слабого звена» существенно упрощает синтез.

Разработана методика синтеза оптимальных по быстродействию управлений линейными и нелинейными системами путем многократного численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Оптимальный закон управления системой составляется из управлений, найденных во время переходного процесса для малых интервалов. Расчет этих управлений осуществляется с учетом технологических требований, ограничений фазовых координат, принятого критерия опти-

мальности, заданного конечного состояния системы и начальных состояний системы на малых интервалах. Методика предполагает действия над разностными уравнениями, которыми описывается поведение системы. В общем случае она представляет собой методику составления программы для численного решения задачи на вычислительных машинах.

Поиск оптимальных управлений на малых интервалах ведется последовательно по шагам с учетом координат системы, полученных при оптимальном управлении на предыдущих шагах. Синтез оптимального управления системой сводится к последовательной оптимизации простых процессов управления.

На первом этапе методом динамического программирования с учетом принятых ограничений рассчитывается прогнозируемое оптимальное управление для очередного шага. Это управление в дальнейшем может быть скорректировано после проведения проверок на отсутствие нарушений ограничений координат во время переходного процесса. На втором этапе определяются координаты системы в результате выполнения пробного шага с найденным прогнозируемым оптимальным управлением. Расчеты ведутся последовательно от входа к выходу системы. На третьем этапе методом имитационного моделирования выполняется перевод системы по оптимальному закону с учетом принятых ограничений из состояния, полученного в результате выполнения пробного шага, в равновесное состояние. Под равновесным состоянием понимается состояние системы, в котором она может оставаться длительное время без изменения координат. На четвертом этапе сравниваются значения координат системы при переводе ее по оптимальному закону в равновесное состояние с допустимыми значениями координат. Если нет нарушений принятых ограничений, то использованное на пробном шаге управление считается оптимальным и его можно использовать на очередном шаге. Эти координаты используются в качестве начальных условий для определения оптимального управления на следующем шаге. Если наблюдаются нарушения принятых ограничений, то использованное на пробном шаге управление не является оптимальным, его следует скорректировать и повторить расчеты по описанному циклу, начиная со второго этапа.

Перевод системы в равновесное состояние выполняется методом имитационного моделирования путем изменения в иерархической последовательности всех координат до установившихся значений. Под установившимся значением фазовой координаты подразумевается такое ее значение, которое она может достичь при изменении по оптимальным законам всех предшествующих фазовых координат до уровней, соответствующих прекращению дальнейшего изменения анализируемой координаты. При изменении координат до установившихся значений по оптимальным законам могут формироваться различные цели, однако всегда используется принцип «ведущего слабого звена» и идет подстройка под самое «сильное» в данный момент ограничение. Сложность состоит в необходимости одновременного выхода на установившееся значение, как анализируемой координаты, так и всех предшествующих координат. Задача усложняется с повышением порядка системы. Все расчеты выполняются по циклическим алгоритмам, для одной и той же координаты могут формироваться цели выхода по оптимальным законам на разные заданные установившиеся значения. Изменение целей связано с необходимостью выполнения предъявляемых к системе противоречивых требований.

Особенностью предложенной методики, в отличие от других методов решения многошаговых задач, в которых приходится анализировать на каждом шаге все возможные варианты управления, является использование промежуточных критериев, позволяющих сразу отсеять заведомо неприемлемые управления и тем самым сократить объем вычислений. Вычисления выполняются по циклическим алгорит-

мам, обеспечивающим перевод координат в установившиеся состояния, поэтому для решения частных задач в процессе поиска оптимального управления можно использовать подпрограммы.

В некоторых случаях удается получить простые аналитические выражения для расчета процесса перевода координат системы в установившиеся состояния после выполнения пробного шага, что открывает широкие перспективы по разработке алгоритмов синтеза в реальном масштабе времени микропроцессорными средствами оптимальных управлений системами высоких порядков.

### Оптимальное управление системой третьего порядка

Управляемый линейный объект описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = X_2, \\ \frac{dX_2}{dt} = X_3, \\ \frac{dX_3}{dt} = U, \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – координаты системы. На управляющее воздействие  $U$  и главную координату  $X_1$  наложены ограничения

$$|U(t)| \leq U_m, \quad (2)$$

$$|X_1(t)| \leq X_m. \quad (3)$$

Определим оптимальное управление  $U(t)$ , обеспечивающее минимальное время  $T$  перевода объекта из исходного состояния  $X_1(0) = 0; X_2(0) = 0; X_3(0) = 0$  в заданное состояние  $X_1(T) = X_m; X_2(T) = 0; X_3(T) = 0$ , с помощью методики последовательного многошагового синтеза.

Решение задачи по предложенной методике предполагает, что речь идет о системе с квантованием координат по уровню и по времени. О текущем времени можно судить по номеру шага интегрирования, равного периоду квантования. При этом объект описывается системой разностных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\Delta X_1}{\Delta t} = X_2, \\ \frac{\Delta X_2}{\Delta t} = X_3, \\ \frac{\Delta X_3}{\Delta t} = U, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3$  – приращения координат системы за шаг интегрирования  $\Delta t$ . Задача заключается в определении управления  $U$  в виде последовательности значений  $U_0, U_1, \dots, U_C$ , обеспечивающих перевод объекта в заданное состояние за минимальное время  $T$ . Методика позволяет синтезировать оптимальные управления при переводе объекта в любое требуемое состояние.

Для устранения противоречий между быстродействием и выполнением ограничений в методике последовательного многошагового синтеза оптимальных управлений используются принципы «перемены цели» и «ведущего слабого звена».

Они позволяют формировать управление, меняя задачи на отдельных интервалах времени. Сложная задача синтеза оптимального управления в этом случае заменяется набором более простых задач.

Для исходного состояния системы на  $n$ -ом шаге интегрирования  $X_{1(n)}$ ,  $X_{2(n)}$ ,  $X_{3(n)}$  первоначально рассчитывается прогнозируемое оптимальное управление  $U_{(n+1)}$  для очередного шага и определяются координаты системы в результате выполнения первого пробного шага  $X_{1(n+1)}$ ,  $X_{2(n+1)}$ ,  $X_{3(n+1)}$ . Затем осуществляется перевод системы в равновесное состояние.

Ставится задача изменения координаты  $X_2$  с предельными возможностями до уровня  $X_2 = 0$  (с одновременным выходом  $X_3$  на уровень  $X_3 = 0$ ). Для этого находится оптимальное управление  $U_{(n+2)}$  и рассчитываются значения координат системы  $X_{1(n+2)}$ ,  $X_{2(n+2)}$ ,  $X_{3(n+2)}$  в результате выполнения второго пробного шага. Затем по циклическому алгоритму решается задача изменения координаты  $X_3$  с предельными возможностями до уровня  $X_{3(k)} = 0$ . Определяются координаты системы  $X_{1(k)}$  и  $X_{2(k)}$  при  $X_{3(k)} = 0$ . Производится оценка значения координаты  $X_{2(k)}$ . Если оно не равно нулю, то рассчитывается еще один пробный шаг по скорейшему достижению координатой  $X_2$  нулевого значения, причем, в качестве начальных условий используются координаты системы  $X_{1(n+1)}$ ,  $X_{2(n+1)}$ ,  $X_{3(n+1)}$  с предыдущего второго пробного шага. По циклическому алгоритму изменяется координата  $X_3$  с предельными возможностями до нулевого значения, оценивается значение координаты  $X_2$  и далее по описанному циклу. Таким способом удастся достичь значений  $X_{2(p)} = 0$  и  $X_{3(p)} = 0$ , соответствующих равновесному состоянию системы. Оценивается значение главной координаты системы  $X_{1(p)}$ . Если оно не превышает заданного значения  $X_m$ , то использованное на первом пробном шаге управление считается оптимальным. В рассматриваемом примере управление  $U_{(n+1)}$  может быть использовано для расчета реальных координат системы на  $(n+1)$  шаге интегрирования. В случае нарушения ограничения ( $X_{1(p)} > X_m$ ) следует изменить прогнозируемое оптимальное управление  $U_{(n+1)}$  и повторить расчеты по описанному циклу, начиная со второго этапа. Синтез оптимального управления для одного шага выполняется по методике, которая применима и для других шагов.

Определение оптимального управления для рассматриваемой системы на  $(n+1)$  шаге интегрирования выполняется в следующей последовательности. Методом динамического программирования рассчитывается управление, обеспечивающее максимальное приращение координаты  $X_1$  на  $(n+1)$  шаге.

Определяется требуемое приращение по координате  $X_1$

$$\Delta X_{1(n+1)} = X_m - X_{1(n)}, \quad (5)$$

затем вычисляется значение координаты  $X_2$ , способное обеспечить это приращение

$$X_{2(n+1)} = \Delta X_{1(n+1)} / \Delta t. \quad (6)$$

Определяется требуемое приращение по координате  $X_2$

$$\Delta X_{2(n+1)} = X_{2(n+1)} - X_{2(n)} \quad (7)$$

и значение координаты  $X_3$ , способное обеспечить это приращение

$$X_{3(n+1)} = \Delta X_{2(n+1)} / \Delta t. \quad (8)$$

Вычисляется требуемое приращение по координате  $X_3$

$$\Delta X_{3(n+1)} = X_{3(n+1)} - X_{3(n)} \quad (9)$$

и обеспечивающее его управление

$$U_{(n+1)} = \Delta X_{3(n+1)} / \Delta t. \quad (10)$$

Это управление ограничивается, при необходимости, на уровне  $U_m$  с соответствующим знаком. Рассчитываются координаты объекта после выполнения первого пробного шага ( $X_{11(n+1)}$ ,  $X_{21(n+1)}$ ,  $X_{31(n+1)}$ ) с найденным управлением:

$$X_{31(n+1)} = X_{3(n)} + U_{(n+1)} \cdot \Delta t, \quad (11)$$

$$X_{21(n+1)} = X_{2(n)} + X_{31(n+1)} \cdot \Delta t, \quad (12)$$

$$X_{11(n+1)} = X_{1(n)} + X_{21(n+1)} \cdot \Delta t. \quad (13)$$

Они используются в качестве начальных условий для перевода объекта в равновесное состояние. Это необходимо для проверки ограничения по  $X_1$ .

Перевод объекта в равновесное состояние начинается с расчета второго пробного шага ( $n+2$ ), выполняемого с целью скорейшего достижения координатой  $X_2$  значения  $X_2 = 0$ . В качестве начальных условий используются координаты системы  $X_{11(n+1)}$ ,  $X_{21(n+1)}$ ,  $X_{31(n+1)}$ , полученные в результате расчета первого пробного шага. Расчет ведется методом динамического программирования, аналогично первому пробному шагу, только теперь изменена цель управления. По аналогичной методике определяются координаты системы в результате выполнения второго пробного шага  $X_{12(n+2)}$ ,  $X_{22(n+2)}$ ,  $X_{32(n+2)}$ . В качестве «ведущего слабого звена» вновь выступает ограниченное управление.

Новые координаты объекта  $X_{32(n+2)}$ ,  $X_{22(n+2)}$ ,  $X_{12(n+2)}$  используются в качестве начальных условий в алгоритме, обеспечивающем изменение координаты  $X_3$  до значения  $X_3 = 0$ , соответствующего установившемуся значению  $X_2$ .

После достижения координатой  $X_3$  значения  $X_3 = 0$  оценивается значение координаты  $X_2$ . Если оно оказывается больше  $X_2(T)$ , то рассчитывается новый пробный шаг по скорейшему достижению координатой  $X_2$  значения  $X_2(T)$ , только в качестве начальных условий используются координаты объекта  $X_{32(n+2)}$ ,  $X_{22(n+2)}$ ,  $X_{12(n+2)}$ , полученные в результате выполнения предыдущего второго пробного шага. Вновь используется алгоритм, обеспечивающий изменение координаты  $X_3$  до значения  $X_3 = 0$ , и оценивается значение координаты  $X_2$ .

Расчеты по такому циклу продолжаются до тех пор, пока координата  $X_2$  не достигнет значения  $X_2 = 0$ . Иногда для одновременного достижения координатами значений  $X_2 = 0$  и  $X_3 = 0$  приходится использовать метод последовательных приближений. Полученные значения  $X_2 = 0$  и  $X_3 = 0$  соответствуют установившемуся состоянию объекта, оценивается значение координаты  $X_1$ . Если оно не превышает значение  $X_m$ , то найденное на первом пробном шаге управление  $U_{(n+1)}$  считается оптимальным. В противном случае управление на ( $n+1$ ) шаге определяется методом последовательных приближений.

Методика позволяет синтезировать оптимальное управление переводом подвижного объекта в заданное состояние за минимальное время и при произвольном изменении возмущающих воздействий в переходном процессе.

### Синтез управления глубиной погружения подводного аппарата

Необходимо синтезировать закон изменения управляющего воздействия, обеспечивающего оптимальный переход с ограниченной скоростью без перерегулирования по положению подводного аппарата на заданную глубину.

Модель объекта представляется обыкновенным дифференциальным уравнением [3]:

$$m \frac{dV}{dt} = F - \xi \cdot V \cdot |V|, \quad (14)$$

где  $F$  – сила, действующая на подводный аппарат;  $m$  – масса аппарата;  $V$  – скорость движения аппарата;  $\xi$  – коэффициент сопротивления.

Полагаем, что силовые воздействия на аппарат  $F_1$  и  $F_2$  имеют форму прямоугольных импульсов, воздействия внешней среды от изменения плотности и солености воды, а также сжатия корпуса незначительны, а коэффициент сопротивления не меняется во время переходного процесса. Импульс, создаваемый силой  $F_1$ , разгоняет аппарат на погружение или всплытие, а импульс, создаваемый силой  $F_2$ , тормозит движение аппарата, стабилизируя его на определенной глубине. Знаки  $F_1$  и  $F_2$  определяют направление перемещения аппарата.

Рассмотрим алгоритм синтеза оптимального по быстродействию управления  $U$  подводным аппаратом при перемещении по глубине. Для поиска управления воспользуемся расчетом пробных шагов, выполняемых с предельными динамическими возможностями в сторону увеличения скорости аппарата и последующими переводами его в равновесные состояния. Анализ текущих значений скоростей и положений аппарата на модели позволит использовать рассчитанные для пробных шагов управления на реальном объекте.

Аппарат перемещается из исходного положения  $L$  в заданное положение  $L_z$  при ограничении скорости движения на уровне  $V_m$ . Начальное значение пути торможения  $L_T$  аппарата до останова после его разгона принимается равным нулю. Расчет управления  $U$  на очередном шаге  $\Delta t$  начинается с определения знака силового воздействия  $F_1$ , которое задает направление перемещения аппарата. При погружении аппарата начальное значение  $U$  принимает отрицательное значение  $F_1$ . Выполняется расчет пробного шага с целью получения максимального приращения скорости аппарата на очередном шаге. По имитационной модели подводного аппарата (14) определяется прогнозируемое значение скорости  $V_p$  после выполнения пробного шага с предельным управляющим воздействием:

$$V_p = V + \frac{U - \xi \cdot V \cdot |V|}{m} \cdot \Delta t. \quad (15)$$

Эта скорость сравнивается с допустимой скоростью движения аппарата  $V_m$ . В случае нарушения ограничения выполняется повторный расчет пробного шага по выражению (15) с управляющим воздействием  $U = 0$ . Таким способом реализуется ограничение по скорости.

Определяется прогнозируемое перемещение аппарата  $L_p$  с начала движения с учетом выполнения пробного шага с найденной скоростью  $V_p$ :

$$L_p = L + |V_p| \cdot \Delta t. \quad (16)$$

Рассчитывается прогнозируемый путь торможения аппарата  $L_{Tp}$  со скорости  $V_p$  до останова после выполнения пробного шага:

$$L_{Tp} = L_T + V_p \cdot \frac{U - \xi \cdot V \cdot |V|}{F_2 - \xi \cdot V_p \cdot |V_p|} \cdot \Delta t. \quad (17)$$

Если  $L_z$  превышает сумму прогнозируемого перемещения аппарата  $L_p$  с начала движения с учетом выполнения пробного шага с найденной скоростью  $V_p$  и прогнозируемого пути торможения аппарата  $L_{Tp}$  со скорости  $V_p$  до останова после выполнения пробного шага, то ранее полученное значение  $U$  используется для управления подводным аппаратом. После выполнения этого шага переменным аппарата  $V$ ,  $L$  и  $L_T$  присваиваются соответственно ранее найденные значения  $V_p$ ,  $L_p$  и  $L_{Tp}$ . По описанной методике, начиная с выражения (15), рассчитываются управления для следующих шагов. Действия по такому циклу (15), (16) и (17) продолжаются до тех пор, пока не будет выполнено условие начала торможения аппарата:

$$L_z \leq (L_p + L_{Tp}). \quad (18)$$

В этом случае на подводный аппарат подается управление  $U$ , равное  $F_2$ , и определяются значения скорости  $V$  и перемещения  $L$  после выполнения очередного шага:

$$V = V + \frac{U - \xi \cdot V \cdot |V|}{m} \cdot \Delta t, \quad (19)$$

$$L = L + |V| \cdot \Delta t. \quad (20)$$

Оценивается скорость перемещения аппарата  $V$ . Если продолжается движение, то на него подается управление  $U$ , равное  $F_2$ , значения скорости и перемещения после выполнения очередного шага определяются по выражениям (19) и (20). После прекращения движения расчет скорости и перемещения аппарата ведется по выражениям (19) и (20) с управляющим воздействием  $U = 0$ . Таким способом исключается перерегулирование по положению.

После выхода на заданную глубину силовое воздействие к аппарату не прикладывается. Алгоритм позволяет определять для любого перемещения длительность приложения силового воздействия  $F_1$ , момент приложения силового воздействия  $F_2$  и начала торможения, момент снятия управляющего воздействия с подводного аппарата. После окончания действия первого импульса  $F_1$  скорость погружения аппарата снижается за счет сил сопротивления движению, а после окончания второго импульса  $F_2$  движение аппарата прекращается и он стабилизируется на глубине. Машинными экспериментами доказана работоспособность предложенного алгоритма управления подводным аппаратом с параметрами  $m=1800$ ,  $F_1=-120$ ,  $F_2 = 100$  и  $\xi = 20$  при различных глубинах погружения и ограничениях скорости.

На рис. 1 приведены переходные процессы при перемещении подводного аппарата с глубины 20 м на глубину 80 м при ограничении максимальной скорости на уровне 1,2 м/с. Алгоритм позволяет определять время погружения подводного аппарата при любых коэффициентах сопротивления, изменять ограничение на скорость перемещения и задания на глубину погружения. Он обеспечивает синтез оптимальных управляющих воздействий за малый интервал времени микропроцессорными средствами с учетом ограничения скорости и требования выхода подводного аппарата на заданную глубину без перерегулирования по положению.

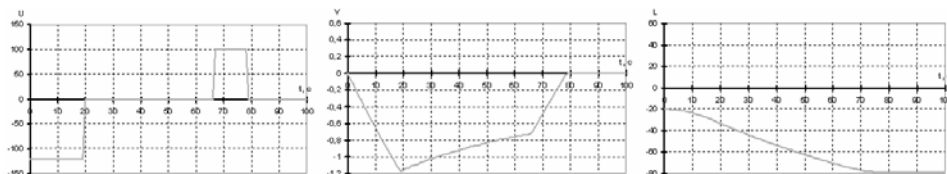


Рис. 1. Переходные процессы при перемещении подводного аппарата.

### Оптимальное управление электродвигателем постоянного тока

В большинстве электромеханических устройств легко прослеживается взаимосвязанность составных частей, структурированность и подчиненность отдельных координат. Процессы протекают не в произвольном порядке, а в определенной последовательности. Синтезируем оптимальное по быстродействию управление двигателем постоянного тока по методике последовательного многошагового синтеза. Электродвигатель описывается уравнениями:

$$U = i \cdot R + C \cdot \omega + L \frac{di}{dt}, \quad (21)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = C \cdot (i - i_c), \quad (22)$$

где  $R$ ,  $L$  – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи;  $J$ ,  $C$  – момент инерции и конструктивный коэффициент двигателя;  $\omega$  – частота вращения;  $U$ ,  $i$  – напряжение и ток якоря;  $i_c$  – ток статической нагрузки;  $t$  – время. Параметры двигателя во время переходного процесса считаются постоянными. Момент статической нагрузки двигателя принимается реактивным. В качестве управляющего воздействия используется напряжение на якоре двигателя.

Численным методом определяется управление  $U(t)$ , обеспечивающее минимум времени перевода двигателя из исходного состояния с координатами  $U(0)$ ,  $i(0)$  и  $\omega(0)$  в новое состояние с координатами  $U(T)$ ,  $i(T)=i_c$  и  $\omega(T) = \omega_m$ . При этом значения частоты вращения  $\omega(t)$ , тока  $i(T)$ , напряжения  $U(T)$  и скорости измене-

ния напряжения  $\frac{dU(t)}{dt}$  не должны превышать предельных значений соответственно  $\omega_m$ ,  $i_m$ ,  $U_m$  и  $\left(\frac{dU(t)}{dt}\right)_m$ .

Составлен алгоритм синтеза оптимального по быстродействию управления двигателем с учетом принятых ограничений. На начальном этапе определяется управление, необходимое для перевода объекта за один шаг из исходного состояния в заданное состояние. При необходимости управление ограничивается на максимальном уровне. Определяются координаты объекта после выполнения пробного шага с найденным управлением. Затем выполняется расчет процесса изменения управления с целью выхода на установившееся значение тока. Производится проверка выполнения ограничения по току. В случае нарушения ограничения по току управление на пробном шаге корректируется. Рассчитывается процесс изменения с предельными возможностями тока двигателя до статического тока без перерегулирования. Таким способом объект переводится в равновесное состояние после выполнения пробного шага. Сравнивается полученное значение частоты вращения двигателя в равновесном состоянии с заданной частотой  $\omega_m$ . Нарушение ограничения по частоте вращения указывает на недопустимость использования управления пробного шага на реальном объекте. Его следует скорректировать и повторить расчеты по описанному циклу. Если отсутствует нарушение ограничения по частоте вращения, то найденное на пробном шаге управление считается оптимальным и используется на реальном объекте. На следующих шагах синтез управления выполняется по аналогичной методике. Алгоритм позволяет обрабатывать с предельным быстродействием возмущения, вводить ограничения на ускорение, учитывать изменения момента инерции и нагрузки.



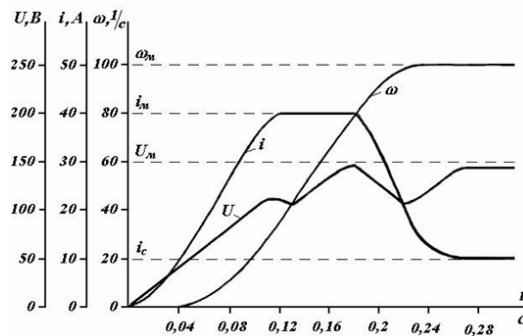


Рис. 2. Переходные процессы при разгоне электродвигателя

На рис. 2 представлен оптимальный по быстродействию процесс разгона электродвигателя с учетом принятых ограничений до частоты вращения 100 рад/с. Параметры системы:  $R=1,5$  Ом;  $L=0,09$  Гн;  $J=0,0522$  Кг•м<sup>2</sup>;

$$C = 1,28 \text{ В}\cdot\text{с} / \text{рад}; i_c = 10 \text{ А}; i_m = 40 \text{ А}; U_m = 150 \text{ В}; \left( \frac{dU(t)}{dt} \right)_m = 10000 \text{ В/с}.$$

Изменение в ходе переходного процесса ограничений, параметров объекта или возмущающего воздействия просто учитываются при синтезе оптимального управления предложенным методом, так как поиск управления на каждом шаге ведется с использованием имитационного моделирования.

Разработан алгоритм синтеза оптимального по быстродействию управления электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения при разгоне без перерегулирования до заданной частоты вращения и питания его от реверсивного вентильного преобразователя с отдельным управлением с ограничением тока двигателя. Исследованы его возможности по воспроизведению заданных траекторий движения с ограничениями рывка и ускорения.

#### Управление позиционными и следящими электроприводами

Супервизорное управление электромеханическими устройствами получило широкое распространение. В позиционных и следящих системах на базе комплектных электроприводов с обратными связями по положению рабочих органов механизмов на микропроцессор возлагается задача синтеза в реальном масштабе времени близких оптимальным по быстродействию законов управления приводом, качественное воспроизведение которых обеспечивается системой автоматического регулирования. Синтез законов выполняется с учетом динамических возможностей электропривода по воспроизведению заданных траекторий движения и технологических требований.

В высокоточных позиционных системах синтез законов управления следует осуществлять с учетом технологических требований и ограничений скорости, ускорения и рывка. При этом становится возможным выполнение любых перемещений с допустимыми значениями динамических моментов, возникающих в механизмах, и сохранение точности механизмов во времени.

Оптимальный закон управления позиционным электроприводом в общем случае состоит из участка разгона до максимальной скорости, участка движения на ней и участка торможения. Средний участок может отсутствовать, если не вступает в действие ограничение по скорости. Составление алгоритмов синтеза в реальном

масштабе времени оптимальных по быстродействию управлений позиционными электроприводами значительно упрощается, если представить координаты системы скорость, ускорение и рывок в единицах одной размерности. Для достижения приводом заданного значения скорости за минимальное время без перерегулирования, при наличии ограничений на рывок и ускорение, необходимо на каждом шаге интегрирования обеспечивать максимально возможное приращение скорости. Уменьшение ускорения следует начинать до достижения заданной скорости. Законы управления позиционным приводом, кроме принятых ограничений, должны учитывать возможное отклонение электропривода от оптимальных траекторий движения. Путь разгона при выходе привода на установившуюся скорость не должен превышать половины заданного перемещения. Выбор максимальной скорости движения позиционного привода следует осуществлять в функции заданного перемещения таким образом, чтобы с учетом дискретности управления путь торможения был не меньше пути разгона. Получены простые аналитические выражения для определения максимальной скорости и пути разгона до нее привода.

На основе предложенной методики разработан алгоритм синтеза управления на участке разгона позиционного электропривода с учетом принятых ограничений. Он предусматривает расчет пробных шагов с последующим переводом системы в установившееся состояние. Анализ координат системы позволяет выбрать управление комплексным электроприводом для очередного шага. Движение на установившейся скорости осуществляется до тех пор, пока остаток перемещения не станет меньше пути торможения, незначительно превышающего путь разгона.

Практическая реализация оптимального по быстродействию закона торможения с учетом принятых ограничений при дискретном управлении связана со значительными трудностями, так как предполагает расчет ускорений привода по шагам со строгим выполнением условия одностороннего подхода к заданной позиции. Целесообразно использовать на участке торможения квазиоптимальные законы управления, которые в отличие от оптимальных законов незначительно увеличивают время отработки задания при строгом соблюдении ограничений. Практическая реализация таких законов относительно проста.

Близкий оптимальному процесс позиционирования получается в случае торможения на начальном участке с постоянным ускорением по параболе, с дальнейшим движением по экспоненте. Противоречия между быстродействием и точностью позиционирования в системе с ограничениями можно существенно уменьшить, изменяя темп торможения в функции ошибки позиционирования и текущего значения скорости привода по нелинейной зависимости таким образом, чтобы обеспечить выход в заданную позицию с малым ускорением на малой скорости. При этом на каждом шаге управления расчет ускорения торможения ведется в предположении равнозамедленного движения с текущего значения скорости до останова, принимая остаток перемещения меньше истинного значения на величину перемещения за один шаг. Задается убывающий запас в пути торможения. Ускорение торможения при этом изменяется по нелинейной зависимости, скорость и ускорение на заключительном этапе позиционирования существенно зависят от темпа уменьшения запаса в пути торможения.

В следящих системах порой задание зависит от информации, считываемой через определенные интервалы времени с датчика положения объекта. Возможно как ступенчатое, так и медленное изменение задающего воздействия. Желательно обеспечивать скорейшую отработку рассогласований с учетом предельных динамических возможностей объектов и технологических ограничений. Принципы формирования оптимальных по быстродействию управлений, разработанные для

позиционных систем, могут успешно применяться в таких системах на базе комплектных электроприводов. Выбор оптимального управления на очередном шаге выполняется путем расчета пробных шагов и последующих переводов системы в установившиеся состояния, что позволяет ликвидировать рассогласования между заданием и реальным положением объекта за минимальное время при строгом выполнении технологических требований и ограничений координат. Непрерывно вычисляется рассогласование по положению между эталонной и действительной траекториями движения. В функции рассогласования производится синтез закона управления приводом с ограничениями рывка, ускорения и скорости, по аналогии с позиционной системой. Находятся максимальная скорость отработки этого рассогласования и путь торможения с нее до останова. Найденная максимальная скорость отработки рассогласования алгебраически суммируется с заданной скоростью движения, привод разгоняется до нее с предельными возможностями за минимальное время без перегулирования. Если сумма скоростей окажется больше допустимого значения для данной системы, то ее следует ограничить. Движение привода на суммарной скорости продолжается до тех пор, пока отклонение эталонной от действительной траектории движения не станет меньше ранее определенного пути торможения. Далее изменение скорости привода выполняется с учетом ограничения на рывок и ускорение как в позиционной системе на участке торможения в функции рассогласования. Задание по скорости на привод на участке торможения определяется суммой двух составляющих от эталонной траектории движения и от алгоритма изменения скорости отработки рассогласования в функции уменьшающейся ошибки по положению.

#### Заключение

Методика последовательного многошагового синтеза позволяет реализовывать предельные динамические возможности и автоматизировать сложные производственные процессы, проектировать системы управления и тренажерные системы, обеспечивать операторов в реальном масштабе времени «советами» по управлению высокоскоростными подвижными объектам.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Беллман Р.* Динамическое программирование. – М.: Изд-во “Иностранная лит-ра”, 1960. – 400 с.
2. *Мясников В.А., Игнатьев М.Б., Покровский А.М.* Программное управление оборудованием. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1974. – 243 с.
3. *Дорри М.Х.* Импульсное управление глубиной погружения подводного аппарата // Сборник трудов XXXIV Всероссийской конференции «Управление движением морскими судами и специальными аппаратами». – М.: ИПУ РАН, 2007. – С. 20–25.

УДК: 519.6

**С.В. Киор, А.М. Романов**

#### **ЦИФРОВОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦМКП-В2**

Современное развитие микроэлектроники, в том числе наличие высокопроизводительных вычислителей и быстродействующих цифро-аналоговых (ЦАП) и аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), позволяет построить высокопроиз-