

УДК 620.179.680

Д.О. Горда

Киевський національний університет строительства и архитектуры

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ТЕКУЩИХ И БУДУЩИХ СОБЫТИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ В САПР ГСРП

*Исследована задача формирования цепочек последовательностей текущих и будущих состояний в процессе моделирования поведения гидравлического следящего рулевого привода (ГСРП)*

**Ключевые слова:** модель, состояние, процесс, идентификация

### Постановка проблемы

При моделировании ГСРП в динамических уравнениях и ограничениях содержатся функциональные зависимости между переменными [1]. Это приводит к тому, что в макромоделе ГСРП используются разные динамические уравнения на разных интервалах времени или в разных областях изменения динамических переменных. В такой составной модели, как правило, присутствуют кусочно-непрерывные или кусочно-дифференцируемые функции времени. Структурная идентификация сводится к выбору математической модели, описывающей процессы в исследуемом объекте. Определим как поведение двух динамических систем качественно совпадает на фазовой плоскости, если они имеют один и тот же тип состояния равновесия. Каких-либо формализованных процедур априорного выбора структуры модели до настоящего времени не существует.

### Методика исследования проблемы

Предлагается теоретико-эмпирический подход к выбору структуры модели, который состоит в следующем:

- на основе априорной информации об изучаемом процессе ГСРП, среде и режиме эксплуатации методами перебора на заданном априори классе моделей формируется тип и предполагаемая структура модели, а также производится параметризация модели методом группового учета аргументов;

- затем на основе экспериментальных и модельных данных выполняется проверка модели на адекватность и, в случае неудовлетворительных результатов, в нее вносятся структурные изменения или выполняется адаптация ее параметров.

Качество регулирования определяется совокупностью показателей, которые характеризуют форму кривой переходного процесса. В качестве критерия оценки управления рассмотрим минимизацию динамического отклонения –

отклонение регулируемой переменной  $y(t)$  от её заданного значения в переходном процессе. В частности это характеризует динамическую точность регулирования, которая определяется варьируемым параметром  $x(t)$ .

Система уравнений, описывающих математическую модель ГСРП, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{a}_1 y + \dot{a}_2 u + \dot{a}_3 p + \dot{a}_4 p + \dot{a}_5 y + \dot{a}_6 u = b_1 \\ \ddots \\ \dot{a}_7 u + \dot{a}_8 y + \dot{a}_9 u + \dot{a}_{10} p = 0 \\ \ddots \\ \dot{a}_{11} y + \dot{a}_{12} p + \dot{a}_{13} p + \dot{a}_{14} u + \dot{a}_{15} y + \dot{a}_{16} z = b_2 \\ \ddots \\ \dot{a}_{17} z + \dot{a}_{18} z + \dot{a}_{19} z + \dot{a}_{20} y + \dot{a}_{21} z = b_3, \end{cases}$$

где приведены следующие обозначения:

$$a_9 = C_0 \quad a_1 = F = -a_2 = a_{10} \quad a_{17} = m$$

$$a_2 = -F \quad a_6 = -k_{Q_e} (k_{3,3} + k_{\partial o}) = -\frac{a_{14} a_1}{a_8}$$

$$a_{11} = m_1 \quad a_{14} = \frac{k_e^c k_{Q_e} (k_{3,3} + k_{\partial o})}{F}$$

$$a_{13} = -\frac{k_e^c (k_{\text{sum}} + k_{Q_p}) + F^2}{F} = \frac{a_8 a_4}{a_1} + a_1$$

$$a_3 = k_c \quad a_4 = k_{\text{sum}} + k_{Q_p} \quad a_{19} = C_{ui}$$

$$a_{18} = h^c \quad a_{12} = -\frac{k_e^c k_c}{F} = \frac{a_8 a_3}{a_1} \quad a_7 = m_2$$

$$b_3 = R_{\text{зое}} \quad a_{15} = C_{np} - \frac{k_e^c k_{Q_e} k_{3,3}}{F} = \frac{a_8 a_5}{a_1} - a_{21}$$

$$a_5 = k_{Q_e} k_{3,3} \quad b_2 = -\frac{k_e^c k_{Q_e} k_{\text{ex}} x_{\text{ex}}}{F} = \frac{a_8 b_1}{a_1}$$

$$a_{16} = -C_{np} \quad b_1 = k_{Q_e} k_{\text{ex}} x_{\text{ex}} \quad a_{21} = C_{np}$$

$$a_8 = -k_g^c \quad a_{10} = F = a_1 = -a_2;$$

$$a_{20} = -C_{np} = a_{16} = -a_{21},$$

где:  $m$  – масса управляющей привода и отнесенной к ней силовой проводки управления, приведенной к направлению движения выходной цепи;

$m_1$  – приведенная масса выходной цепи;

$m_2$  – приведенная масса конструкции управляющего привода, связанная с опорой крепления;

$C_{np}$  – приведенная жесткость силовой проводки системы управления между выходным звеном привода и органом управления;

$C_0$  – жесткость опоры крепления управляющего привода;

$C_{ш}$  – коэффициент шарнирной нагрузки;

$z$  – координата, определяющая положение массы  $m$ ;

$y$  – выходная координата управляющего привода;

$u$  – координата, определяющая деформацию опоры крепления управляющего привода;

$x_{вх}$  – перемещение входной качалки управляющего привода;

$F$  – эффективная площадь поршня управляющего привода;

$R_{зов}$  – внешние силы, действующие на поверхность управления, приведенные к координате  $z$ ;

$p$  – перепад давления на поршне управляющего привода;

$\mathcal{E}$  – невязка на золотнике управляющего привода;

$k_c$  – приведенный коэффициент жесткости рабочей жидкости в полостях гидроцилиндра управляющего привода;

$k_{внт}$  – коэффициент вытока;

$k_{3,3}$  – коэффициент обратной связи;

$k_{пер}$  – коэффициент передачи;

$k_{доо}$  – коэффициент учета влияния деформации опоры крепления привода на величину невязки на золотнике;

$k_{вх}$  – коэффициент погрешности перемещения;

$h^c$  – эквивалентный коэффициент вязкости трения в зависимости от амплитуды и частоты колебаний координаты  $z$ ;

$$k_{303} = k_{доо} - k_{3,3};$$

$k_b^c$  – эквивалентный коэффициент вязкости трения гидродвигателя рулевого привода;

$y_1$  – относительное перемещение штока и цилиндра гидродвигателя рулевого привода;

$k_{Q_e}, k_{Q_p}$  – коэффициенты разложения в ряд Тейлора функции затрат жидкости через золотник распределителя.

## Основные исследования

Формирование цепочек текущих и будущих событий при моделировании в САПР ГСРП проиллюстрируем на примере процессов перехода ГСРП в предельные состояния [2].

1. Процесс обрыва силовой проводки системы управления между выходной цепью рулевого привода и рулём.

$$C_{np} = 0, \text{ т.е. } a_{16} = a_{20} = a_{21} = 0, \quad a_{15} = a_5 a_8 / a_1.$$

2. Процесс проскальзывания.

$$k_g^c = 0, \text{ т.е. } b_2 = a_{14} = a_{12} = a_8 = 0, \quad a_{15} = a_{21} = A,$$

$$a_{16} = a_{20} = A, \quad a_1 = a_2 = a_{10} = a_{13} = B.$$

3. Процесс потери эффективности обратной связи.

$$\kappa_{3,3} = 0, \quad \text{т.е.} \quad a_{15} = a_{21} = a_{16} = a_{20}, \quad a_5 = 0,$$

$$a_6 = a_{14} a_1 / a_8.$$

4.  $C_{np} = 0, k_g^c = 0$ , т.е.

$$b_2 = a_{14} = a_{12} = a_8 = a_{15} = a_{16} = a_{20} = a_{21} = 0,$$

$$a_1 = a_2 = a_{10} = a_{13} = B.$$

5.  $C_{np} = 0, \kappa_{3,3} = 0$ , т.е.

$$a_{15} = a_{21} = a_{16} = a_{20} = a_5 = 0, \quad a_6 = a_{14} a_1 / a_8$$

6.  $k_g^c = 0, \kappa_{3,3} = 0$ , т.е.

$$a_5 = a_6 = b_2 = a_{14} = a_{12} = a_8 = a_{15} = a_{16} = a_{20} = a_{21} = 0$$

$$a_1 = a_2 = a_{10} = a_{13} = B.$$

7.  $C_{np} = 0, k_g^c = 0, \kappa_{3,3} = 0$ , т.е.

$$a_5 = a_6 = b_2 = a_{14} = a_{12} = a_8 = a_{15} = a_{16} = a_{20} = 0,$$

$$a_1 = a_2 = a_{10} = a_{13} = B.$$

Пусть:  $\kappa_{3,3} = \kappa_{3,3}(t), C_{np} = C_{np}(t), k_g^c = k_g^c(t),$

$$\|\bar{x}(t) - \bar{x}(t_0)\| \leq L(t - t_0)$$

$$\bar{y} = A(C_{np}, k_g^c, \kappa_{3,3}, \bar{x}, t) \equiv S_0,$$

$$A(\mathcal{E}, k_g^c, \kappa_{3,3}, \bar{x}(t), t) \equiv S_1^\mathcal{E}(\bar{x}, t),$$

$$A(C_{np}, \mathcal{E}, \kappa_{3,3}, \bar{x}(t), t) \equiv S_2^\mathcal{E}(\bar{x}, t)$$

$$A(C_{np}, k_g^c, \mathcal{E}, \bar{x}(t), t) \equiv S_3^\mathcal{E}(\bar{x}, t),$$

$$A(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \kappa_{3,3}, \bar{x}(t), t) \equiv S_4^{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2}(\bar{x}, t),$$

$$A(\mathcal{E}_1, k_g^c, \mathcal{E}_2, \bar{x}(t), t) \equiv S_5^{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2}(\bar{x}, t),$$

$$A(C_{np}, \mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \bar{x}(t), t) \equiv S_6^{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2}(\bar{x}, t)$$

$$A(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \bar{x}(t), t) \equiv S_7^{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 \mathcal{E}_3}(\bar{x}, t)$$

$$\forall i \exists T_i : \lim_{t \rightarrow T_i} |\varepsilon_i(t)| = 0, \forall i, t \geq t_0, \bar{x}(t) \succ \bar{x}(t_0) :$$

(на основе теоремы Пуанкаре)

$$\lim_{|\varepsilon_i| \rightarrow 0} S_i^{\varepsilon_1} = S_i^0,$$

$$\lim_{|\varepsilon_{1,2,3}| \rightarrow 0} S_i^{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3} = S_i^{000}$$

$$\lim_{|\varepsilon_{1,2}| \rightarrow 0} S_i^{\varepsilon_1 \varepsilon_2} = S_i^{00},$$

Исходное состояние  $(\bar{y}_0, T_0)$  реализуемо с точностью  $\underline{\varepsilon}$ , если:

$$\exists i : S_i^{\varepsilon}(\bar{x}, T_0) \in O_{\varepsilon}(\bar{y}_0),$$

т.е. задача Коши имеет решение в окрестности заданной точки.

Пусть  $\tilde{y}_*^l(\bar{x}(t_0 + \Delta t(l), t_0 + \Delta t(l)))$  -

измеряемые значения критериальных параметров на l-м шаге. И пусть на классе моделей в исходной ОДЗ существует искомое управление, т.е.:

$$S_i^{\{\varepsilon\}_{i,l}}(x, t_0 + \Delta t(l)) \equiv S_i^{\{\varepsilon(t_0 + \Delta t(l))\}_i}(\bar{x}(t_0 + \Delta t(l)), t_0 + \Delta t(l))$$

$$\Delta_i(t_0 + \Delta t(l)) \equiv \left\| \tilde{y}_*^l - S_i^{\{\varepsilon\}_{i,l}}(x, t_0 + \Delta t(l)) \right\|,$$

$$\{\Delta_i(\infty)\} \equiv \Delta^\infty$$

$$\exists \{i\}, l_0, \forall i \in \{i\}, \forall l \geq l_0 : \Delta_i(t_0 + \Delta t(l)) \leq \varepsilon$$

Откуда следует:

$$\lim_{\Delta t(l) \rightarrow 0, l \rightarrow \infty} S_i^{\{\varepsilon\}_{i,l}}(x, T_* - \Delta t(l)) = \vec{x}_*^l \rightarrow S_i^{\{0\}_i}(T_*)$$

равномерно.

$$i^*(l) \equiv \{ \{i\} : \min_i \Delta_i(t_0 + \Delta t(l)) \},$$

$$ind(l) = \begin{cases} 0 : i^*(l) = i^*(l-1) \\ 1 : i^*(l) \neq i^*(l-1) \end{cases} \text{ Тогда:}$$

$$\{l\}_{det} \equiv \{l\} : \begin{cases} \exists l_0 \forall l \geq l_0 : ind(l) = 0 - \text{система} \\ \text{устойчиво-идентифицируемая} \\ \exists l_{01}, l_{02}, \forall l \in (l_{01}, l_{02}) : ind(l) = 0 - \\ \text{система-идентифицируемая-} \\ \text{на-интервале} \\ \exists l_0 \forall l \geq l_0 \in (1, l_0] : ind(l) = 0 - \text{система} \\ \text{идентифицируемая-на-предистории} \end{cases}$$

Учитывая неопределённость моделирования в начальный момент времени и заданные критериальные значения в конечный момент времени, минимально необходимо для структурной идентификации методом построения адекватного управления три временных интервала – цепь четырёх последовательных состояний (рис. 1).

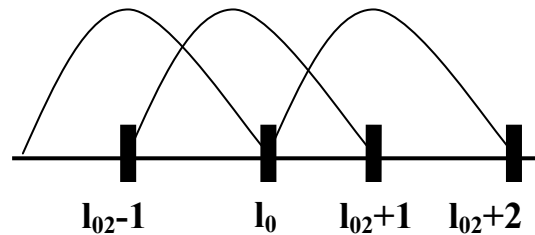


Рис.1. Временные интервалы для формирования цепочки событий

Рассмотрим случаи состояний гидропривода, приведенные в табл.1.

Таблица 1

Значения функции идентификации при зависимости от состояния

	Ind(l <sub>02</sub> -1)	Ind(l <sub>02</sub> )	Ind(l <sub>02</sub> +1)
1	≠ 0	≠ 0	≠ 0
2	≠ 0	≠ 0	= 0
3	= 0	≠ 0	≠ 0
4	= 0	≠ 0	= 0
5	≠ 0	= 0	≠ 0
6	≠ 0	= 0	= 0
7	= 0	= 0	≠ 0
8	= 0	= 0	= 0

Случаи 2,4,6,8 соответствуют реализуемой идентификации системы.

Случай 1.

Если Ind(l<sub>02</sub> -1) = Ind(l<sub>02</sub> +1), то соответствуют реализуемой идентификации системы.

Если Ind(l<sub>02</sub> -1) = Ind(l<sub>02</sub> +1) = Ind(l<sub>02</sub> +2), то соответствуют реализуемой идентификации системы после удаления выброса из выборки.

Во всех остальных случаях наблюдается переходной процесс.

Случай 3

Если Ind(l<sub>02</sub> -1) = Ind(l<sub>02</sub> +1), то соответствуют реализуемой идентификации системы.

Если Ind(l<sub>02</sub> -1) = Ind(l<sub>02</sub> +1) = Ind(l<sub>02</sub> +2), то соответствуют реализуемой идентификации системы после удаления выброса из выборки (сл.6).

Во всех остальных случаях наблюдается переходной процесс.

Случай 5

Если Ind(l<sub>02</sub> -1) = Ind(l<sub>02</sub> +1), то соответствуют реализуемой идентификации системы.

Если  $\text{Ind}(l_{02} - 1) = \text{Ind}(l_{02} + 1) = \text{Ind}(l_{02} + 2)$ , то соответствуют реализуемой идентификации системы после удаления выброса из выборки (сл.6).

Во всех остальных случаях наблюдается переходной процесс.

Случай 7.

Если  $\text{Ind}(l_{02} + 2) = 0$ , идентификация ступеньки-смены модели.

Если  $\text{Ind}(l_{02} + 2) \neq 0$ ,  $i^*(l_{02}) = i^*(l_{02} + 2)$ , то соответствуют реализуемой идентификации системы после удаления выброса из выборки (сл.6).

Если  $\text{Ind}(l_{02} + 2) \neq 0$ ,  $i^*(l_{02}) \neq i^*(l_{02} + 2)$ , наблюдается переходной процесс.

Определим величину шага по времени  $\Delta t(l)$ .

Пусть  $\varepsilon_0$  – заданная точность управления

$$\text{т.е. } \exists i : S_i^{\varepsilon_0}(\bar{x}, T_*) \in O_{\varepsilon_0}(\bar{y}^*)$$

$$\forall i \exists T_i : \lim_{t \rightarrow T_i} |\varepsilon_i(t)| = 0;$$

$$\forall i, t \geq t_0, \bar{x}(t) \succ \bar{x}(t_0) : \Delta_i(t_0 + \Delta t) \equiv$$

$$\equiv \left\| \tilde{y}_*^l - S_i^{\{\varepsilon_i, l\}}(x, t_0 + \Delta t(l)) \right\|$$

$$\left\| \bar{x}(t) - \bar{x}(t_0) \right\| \leq L(t - t_0);$$

$$L \equiv \max_i \left| \max_{t \in [0, T]} x_i(t) - \min_{t \in [0, T]} x_i(t) \right| / T$$

$$\Delta_i(t_0 + \Delta t(l)) \leq L \Delta t^2(l) \max_{t \in [0, T]} \|S_0\| \leq L \Delta t^2(l) \max Y$$

$$\varepsilon_0 \leq L \Delta t^2(l) \max Y,$$

где

$\max Y$  -максимальное передвижение штока ГСРП.

$$\Delta t(l) \geq \sqrt{\varepsilon_0 / (L \max Y)}$$

Определим величину шага по  $\varepsilon_i$ .

$$L_\varepsilon \equiv \max_i L_{\varepsilon_i} \leq \max_i \varepsilon_i(0) / T,$$

т.к.

$$\forall i, t : \varepsilon_i(t) \geq 0, \varepsilon_i(t) \downarrow \downarrow, \varepsilon_i(t) \in C[0, \infty) \Rightarrow \exists L_{\varepsilon_i}, \forall t_1 \leq t_2 \leq T < \infty : |\varepsilon_i(t_2) - \varepsilon_i(t_1)| \leq L_{\varepsilon_i} (t_2 - t_1)$$

$$\varepsilon = (L_\varepsilon \Delta t(l)) \geq \sqrt{\varepsilon_0} \max_i \varepsilon_i(0) / T \sqrt{L \max Y}$$

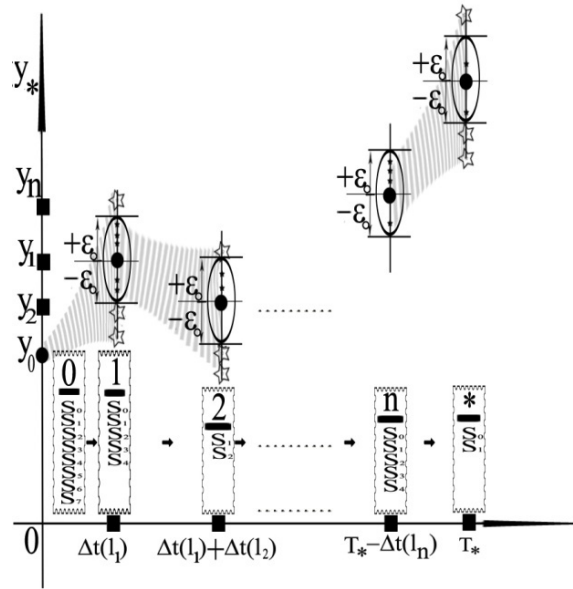


Рис.2. Общий ход оптимизации структурной идентификации

Общий ход оптимизации процесса представлен на рис. 2.

В итоге на завершающем шаге возможно два состояния, представленные на рис.3.

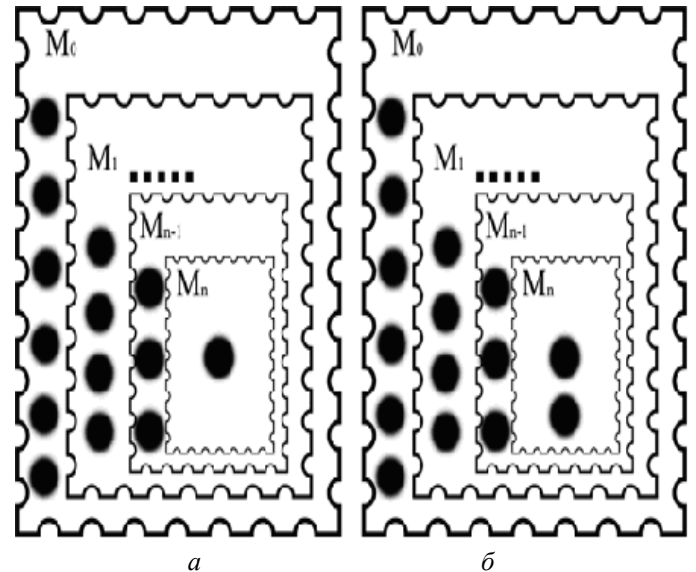


Рис.3. Завершающий этап структурной идентификации

В случае рис.3,а процесс завершился однозначной идентификацией и за счёт решения краевой задачи методом Рунге-Кутты для определенной модели процесса находится искомое управление.

В случае рис.3,б процесс не может однозначно завершиться и идентифицирован как переходной процесс между определёнными на последнем шаге состояниями системы.

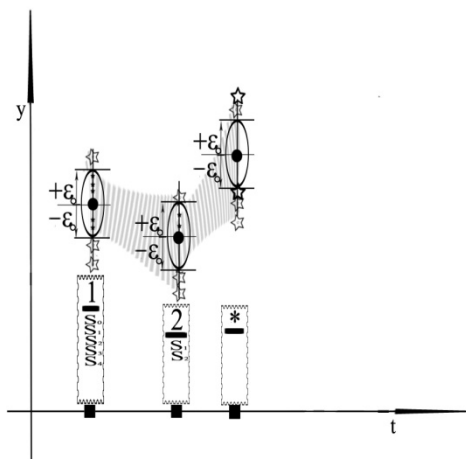


Рис.4. Пример тупика. Невозможность реализовать текущую итерацию из-за не выполнения ограничения по точности

В случае представленном на рис.4 невозможность реализовать текущую итерацию из-за невыполнения ограничения по точности приводит к выполнению данной итерации за счёт моделей отсечённых на предыдущем шаге ( $S_0, S_3, S_4$ ), а в случае невозможности реализовать текущую итерацию и для данного набора моделей — выполнению данной итерации за счёт моделей отсечённых от начальной итерации ( $S_5, S_6, S_7$ ). Если и в этом случае невозможно реализовать текущую итерацию из-за невыполнения ограничения по точности, принимается решение о недостижимости критериального состояния системы из заданного начального состояния при заданных ограничениях.

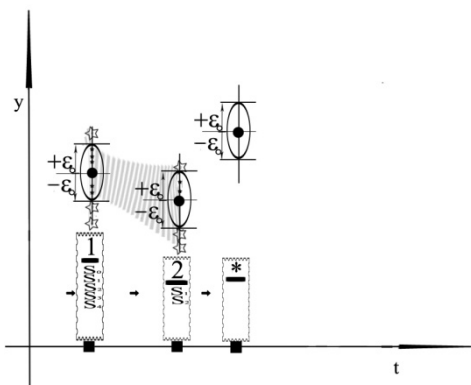


Рис.5. Пример тупика. Невозможность реализовать текущую итерацию из-за невыполнения функциональных ограничений

В случае, представленном на рис.5, невозможность реализовать текущую итерацию из-за невыполнения функциональных ограничений ( $x(t)$ ) приводит к выполнению данной итерации за счёт моделей отсечённых на предыдущем шаге ( $S_0, S_3, S_4$ ), а в случае невозможности реализовать текущую итерацию и для данного набора моделей — выполнению данной итерации за счёт моделей отсечённых от начальной итерации ( $S_5, S_6, S_7$ ). Если и

в этом случае невозможно реализовать текущую итерацию из-за невыполнения ограничения функциональных ограничений ( $x(t)$ ), принимается решение о недостижимости критериального состояния системы из заданного начального состояния при заданных ограничениях.

## Выводы

Таким образом, допустимое изменение вектора управляющих переменных на каждом шаге определяется в результате решения двух задач: прогноза рассогласования регулируемых переменных на текущий шаг управления и минимизации прогноза рассогласования в общем случае при наличии ограничений.

Для прогноза свободного рассогласования регулируемых переменных применяются методы прогнозирования временных рядов. В частности, для получения краткосрочного прогноза в качестве прогнозируемой функции могут использоваться модели тренда временных рядов, для описания которого используют линейные или линеаризуемые относительно параметров функции.

Для повышения точности прогноза предыдущие наблюдения временного ряда разбиваются на обучающий и экзаменующий временные ряды.

Обучающий ряд используется для определения параметров прогнозирующей функции. Оптимизация прогноза достигается поиском оптимальной длины обучающего ряда (основания прогноза), минимизирующей ошибку прогноза на экзаменующем ряду при заданном времени (горизонте) прогнозирования.

Описанный метод формирования цепей текущих и будущих событий при моделировании в САПР ГСРП структурно идентифицирует наиболее существенные переменные и параметры с учётом их степени нелинейности, адаптирует выбор шага дискретизации съёма экспериментальных данных.

## Список литературы

- 1.Пелевін Л.С., Горда О.В., Горда Д.О. Дослідження математичної моделі гідромеханічного слідуючого приводу // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. К.: КНУБА, 2004 Вип. 63 С.35 – 42.
- 2.Цюцюра С.В., Горда Д.О. Структури даних імітаційної моделі перехідних процесів гідропроводу // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. К.: КНУБА, Вип. 69, 2007 С.75 – 81.

Стаття надійшла до редколегії 20.12.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф.. С.В. Цюцюра, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ