In the paper the process algebra as the tool for the formal description of complex discrete systems is submitted. The structure of sets on which variables and expressions of process algebra are determined is considered. Syntactic structures and semantic rules of performance of the operations allowing to set the formal description for simulations with real working load are described. For definition of adequacy of model it is offered to use the principles of equivalence basing on congruence, strong and weak bisimilarity.

У роботі представлена алгебра процесів як інструмент для формального опису складних дискретних систем. Розглянуто структуру множин, на яких визначені змінні і вирази алгебри процесів. Описано синтаксичні конструкції і семантичні правила виконання операцій, що дозволяють задавати формальний опис імітаційних моделей з реальним робочим навантаженням. Для визначення адекватності моделі запропоновано використовувати принципи еквівалентності, що базуються на конгруентності, строгій і слабкій взаємній подібності.

УДК 62-52.087

А. Л. Становский, Т. В. Лысенко, Т. И. Носенко, Е. В. Лысенко

СИНХРОНИЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭКСТРЕМУМАМИ ОТДАЛЕННЫХ СОСТОЯНИЙ

Определено понятие «событие» в теории синхронизирующего управления как поименованное состояние. Выполнена классификация событий. Предложен метод нейросеточной экстраполяции дискретных числовых временных трендов, основанный на замене значений тренда в узловых точках на значения производной интерполяционного полинома в этих же точках.

ВВЕДЕНИЕ

Теория синхронизирующего управления предполагает поиск и реализацию такого внешнего воздействия на объект, которое обеспечивает в будущем (иногда, весьма отдаленном) совпадение некоторых событий, ожидаемых в его подсистемах [1].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Понятие «событие» определено в теории вероятностей как «всякий результат или исход испытания» [2] и является аксиоматической основой для построения булевой алгебры событий.

Пусть некоторая система Ω определена в n_{Ω}-мерном пространстве состояний $\mathbf{\Omega}(\tau)$, где τ – время. Разобьем $\mathbf{\Omega}(\tau)$ на k множеств:

$$\begin{gathered}\mathbf{Y}_1(\tau) = \{y_{11}(\tau),\ y_{12}(\tau),\ \ldots,\ y_{1n_1}(\tau)\},\\ \mathbf{Y}_2(\tau) = \{y_{21}(\tau),\ y_{22}(\tau),\ \ldots,\ y_{2n_2}(\tau)\},\\ \ldots\\ \mathbf{Y}_k(\tau) = \{y_{k1}(\tau),\ y_{k2}(\tau),\ \ldots,\ y_{kn_k}(\tau)\}\end{gathered}$$

с размерностями n_1, n_2, … n_k, соответственно, которые могут частично пересекаться между собой. Назовем части общей системы Ω, определенные на $\mathbf{Y}_1(\tau)$, $\mathbf{Y}_2(\tau)$, …, $\mathbf{Y}_k(\tau)$, соответственно подсистемами Y_1, Y_2, …, Y_k.

Выделим в подсистемах Y_1, Y_2, …, Y_k *поименованные состояния*:

$$\begin{gathered}\mathbf{Y}_1^{S_{11}}(\tau) = \left\{y_{11}^{S_{11}}(\tau), y_{12}^{S_{11}}(\tau), \ldots, y_{1n_1}^{S_{11}}(\tau)\right\},\\ \mathbf{Y}_1^{S_{12}}(\tau) = \left\{y_{11}^{S_{12}}(\tau), y_{12}^{S_{12}}(\tau), \ldots, y_{1n_1}^{S_{12}}(\tau)\right\},\\ \ldots\\ \mathbf{Y}_1^{S_{1q_1}}(\tau) = \left\{y_{11}^{S_{1q_1}}(\tau), y_{12}^{S_{1q_1}}(\tau), \ldots, y_{1n_1}^{S_{1q_1}}(\tau)\right\},\\ \mathbf{Y}_2^{S_{21}}(\tau) = \left\{y_{21}^{S_{21}}(\tau), y_{22}^{S_{21}}(\tau), \ldots, y_{2n_2}^{S_{21}}(\tau)\right\},\\ \mathbf{Y}_2^{S_{22}}(\tau) = \left\{y_{21}^{S_{22}}(\tau), y_{22}^{S_{22}}(\tau), \ldots, y_{2n_2}^{S_{22}}(\tau)\right\},\\ \ldots\\ \mathbf{Y}_2^{S_{2q_2}}(\tau) = \left\{y_{21}^{S_{2q_2}}(\tau), y_{22}^{S_{2q_2}}(\tau), \ldots, y_{2n_2}^{S_{2q_2}}(\tau)\right\},\\ \ldots\\ \mathbf{Y}_k^{S_{k1}}(\tau) = \left\{y_{k1}^{S_{k1}}(\tau), y_{k2}^{S_{k1}}(\tau), \ldots, y_{kn_k}^{S_{k1}}(\tau)\right\},\\ \mathbf{Y}_k^{S_{k2}}(\tau) = \left\{y_{k1}^{S_{k2}}(\tau), y_{k2}^{S_{k2}}(\tau), \ldots, y_{kn_k}^{S_{k2}}(\tau)\right\},\\ \ldots\\ \mathbf{Y}_k^{S_{kq_k}}(\tau) = \left\{y_{k1}^{S_{kq_k}}(\tau), y_{k2}^{S_{kq_k}}(\tau), \ldots, y_{kn_k}^{S_{kq_k}}(\tau)\right\},\end{gathered}$$

которые могут (или не могут) быть достигнуты на интервалах времени $\tau_{\min 1} \le \tau \le \tau_{\max 1}$; $\tau_{\min 2} \le \tau \le \tau_{\max 2}$; …; $\tau_{\min k} \le \tau \le \tau_{\max k}$ соответственно.

Назовем эти поименованные состояния системы Ω *событиями* $\Sigma\{S_{11}, S_{12}, \ldots, S_{1q_1}; S_{21}, S_{22}, \ldots, S_{2q_2}; \ldots; S_{k1}, S_{k2}, \ldots, S_{kq_k}\}$, причем для каждой из подсистем $Y_1, Y_2, \ldots, Y_k$ в отдельности будем считать события, происходящие в них, несовместными:

$$S_{11} \cap S_{12} \cap \ldots \cap S_{1q_1};$$
$$S_{21} \cap S_{22} \cap \ldots \cap S_{2q_2};$$
$$\ldots$$
$$S_{k1} \cap S_{k2} \cap \ldots \cap S_{kq_k}.$$

Поскольку в процессе движения системы Ω во времени и пространстве своих состояний на время наступления событий, кроме учитываемых, влияет множество других факторов и помех, события $S_{11}, S_{12}, \ldots, S_{1q_1}; S_{21}, S_{22}, \ldots, S_{2q_2}; \ldots; S_{k1}, S_{k2}, \ldots, S_{kq_k}$ наступают с вероятностями $p_{11}, p_{12}, \ldots, p_{1q_1}; p_{21}, p_{22}, \ldots, p_{2q_2}; \ldots; p_{k1}, p_{k2}, \ldots, p_{kq_k}$.

Дополним перечень событий в каждой из подсистем $Y_1, Y_2, \ldots, Y_k$ «нулевыми» событиями $S_{01}, S_{02}, \ldots, S_{0k}$, означающими, что в соответствующей подсистеме не произошло ни одного из перечисленных событий $S_{11}, S_{12}, \ldots, S_{1q_1}; S_{21}, S_{22}, \ldots, S_{2q_2}; \ldots; S_{k1}, S_{k2}, \ldots, S_{kq_k}$. Вероятности нулевых событий обозначим через $p_{10}, p_{20}, \ldots, p_{k0}$. Тогда

$$p_{11} + p_{12} + \ldots + p_{1q_1} + p_{10} = 1;$$
$$p_{21} + p_{22} + \ldots + p_{2q_2} + p_{20} = 1;$$
$$\ldots$$
$$p_{k1} + p_{k2} + \ldots + p_{kq_k} + p_{k0} = 1.$$

Отметим также то, что события в пределах одной подсистемы считаются несовместными, а в пределах разных подсистем – независимыми.

На основе изложенного, а также, принимая за аксиому определение вероятности, приведенное, например, в [3], определим событие S как идеализированный элемент некоторого класса Σ, на котором определена однозначная действительная функция $P\{S\}$, удовлетворяющая условиям:

1) $P\{S\} > 0$ для любого S из Σ;

2) $P\{I\} = 1$ для достоверного события;

3) $P\{S_1 \cup S_2 \cup \ldots\} = P\{S_1\} + P\{S_2\} + \ldots$ для любой (конечной или бесконечной) последовательности попарно несовместных событий $S_1, S_2, \ldots$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБЫТИЯ

Определения события как «поименованного состояния» позволяет классифицировать их в зависимости от содержания поименования.

В простейшем случае такое поименование представляет собой назначение конкретных числовых значений переменным вектора $\mathbf{Y}^S(\tau)$: $y_1^s(\tau) = a_1$, $y_2^s(\tau) = a_2, \ldots, y_n^s(\tau) = a_n$. При этом набор чисел $a_1, a_2, \ldots, a_n$ обуславливает какое-либо отношение. Например, событие S «концентрация угарного газа СО в рабочей зоне равна 50 мг/м^3» определяет отношение «концентрация СО не опасна для здоровья работников цеха». Назовем такое состояние *событием первого рода* [4].

Иногда количественные изменения переменных вектора $\mathbf{Y}^S(\tau)$ приводят к качественным переходам в системе. К таким качественным преобразованиям могут быть отнесены, например, фазовые превращения (плавление, кристаллизация, кипение, конденсация и т. п.), исчезновение или возникновение фаз (выпадение осадка, растворение и т. п.), прорывы газовых пузырей, скачкообразное изменение цвета и многое другое. Набор значений чисел $a_1, a_2, \ldots, a_n$, обуславливающих качественное изменение, назовем *событием второго рода* [5].

Событиями третьего рода будем считать экстремумы функций $y_1^S(\tau), y_2^S(\tau), \ldots, y_n^S(\tau)$.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ЭКСТРЕМУМОВ

Очевидно, для достижения цели синхронизирующего управления в акте синхронизации может одновременно участвовать *произвольное* количество событий *разного* рода.

Во всех случаях синхронизирующего управления соответствующая АСУ должна иметь в своем составе прогнозирующий компонент, экстраполирующий во времени значения переменных вектора $\mathbf{Y}^S(\tau)$. Для этого функции $y_1^S(\tau), y_2^S(\tau), \ldots, y_n^S(\tau)$ должны быть определены на интервале времени, априори включающем будущее время синхронизации. Решение такой задачи аналитически не всегда возможно, поэтому в некоторых случаях (например, для временных трендов) экстраполяция может быть выполнена с помощью нейронной сети (НС).

В последнем случае наибольшие проблемы возникают при прогнозировании событий третьего рода, поскольку НС испытывают затруднения при прогнозировании экстремумов, так как для идентификации экстремума нужны, как минимум, три точки экстраполяции. Так, например, в «прямом» эксперименте НС, обученной методом «скользящего окна», не удалось предсказать максимум тестового тренда, представленного на рис. 1, *а*. Тренд содержит 13 «предыдущих» точек (на рисунке показаны последние 5), одну «текущую» и три «будущие», причем, среди последних – подлежащий прогнозированию максимум в точке

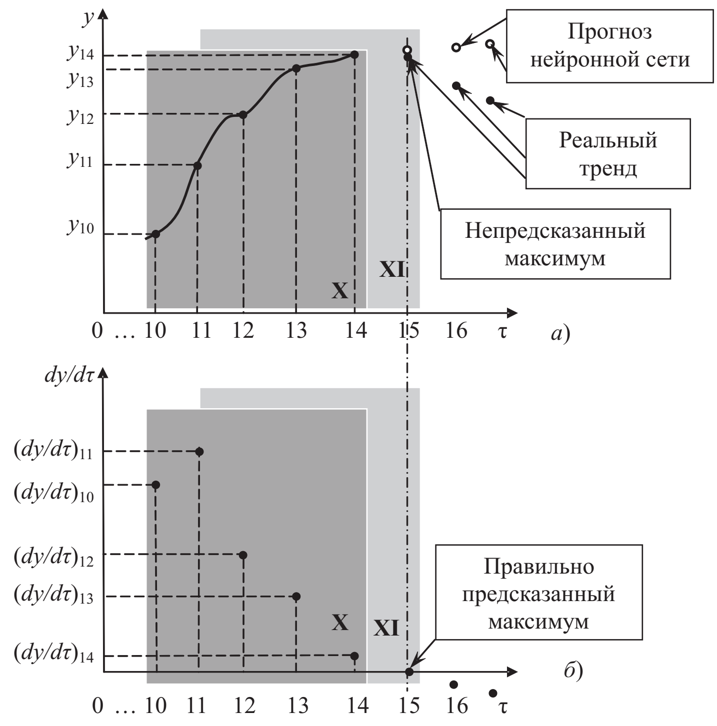

Рисунок 1 – Нейросеточное прогнозирование максимума тренда в точке 15 методом «скользящего окна» по значениям производных интерполяционного полинома в узловых точках 0…14:

X – десятое (последнее) «окно» обучающей выборки; **XI** – одиннадцатое «окно», на котором должен быть предсказан максимум

$\tau = 15$. Четырнадцать имеющихся точек позволили построить десять скользящих окон (по пять точек в окне) и обучить по ним нейронную сеть прямого распространения структуры $5 \times 20 \times 1$. Однако предсказанные значения тренда в «будущих» точках 15, 16 и 17, к сожалению, не позволили выявить максимум (пунктирная линия).

Тогда был предложен «косвенный» метод поиска экстремума дискретного тренда, алгоритм которого выглядит следующим образом.

1. Подлежащий экстраполяции тренд аппроксимируется в области своего существования функцией $y(\tau)$; $0 \le \tau \le 17$ степенным полиномом вида (рис. 1, *а*):

$$g(\tau) = \sum_{k=0}^{13} a_k \tau^k, \tag{1}$$

проходящего через точки исследуемого тренда:

$$g(\tau_k) = y_k; \;\; k = 0, 1, \ldots, 13. \tag{2}$$

Величина k принята равной 13, т. к. количество узлов интерполяционного полинома (они же – суть точки исследуемого тренда) должно быть на единицу больше его степени.

2. Определяется производная интерполяционного полинома $dg(\tau)/d\tau$ и рассчитываются ее значения в точках 0…14 (рис. 1, *б*).

3. По этим значениям формируются десять «скользящих окон», обучается та же НС и осуществляется прогнозирование.

4. Выбирается значение производной интерполяционного полинома, наиболее близкое к оси τ, и соответствующая ему точка тренда признается экстремумом последнего.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Практическое применение данного метода было рассмотрено на примере управления литьем в песчано-смоляные формы. В качестве объекта были выбраны процессы тепломассообмена в системе «отливка – форма» после заливки металла. В объекте были выделены термическая и массовая подсистемы, событиями в этих подсистемах, соответственно, были приняты: достижение температурой отливки значения начала кристаллизации (событие второго рода) и достижение давлением газов в порах формы максимума (событие третьего рода).

Управление обеими подсистемами процесса тепломассообмена осуществлялось с помощью внешнего воздействия на систему «отливка – форма» путем регулирования интенсивности принудительной аспирации газов из формы.

Применение синхронизирующего управления процессами литья позволило выявить технологические методы повышения качества отливок, а их практическая реализация на нескольких предприятиях машиностроения – получить положительный технико-экономический эффект.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. *Становский А. Л., Лысенко Т. В.* Использование муар-эффекта при синхронизации событий // Труды Одесского политехнического университета. – 2006. – Вып. 1 (25). – С. 114–118.
2. *Маркович Э. С.* Курс высшей математики с элементами теории вероятностей и математической статистики. – М.: Высшая школа, 1972. – 480 с.
3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 831 с.
4. *Найдек В. Л., Становский А. Л., Лысенко Т. В.* Оптимизация процессов в системе «отливка – форма» за счет синхронизации событий // Материалы XIII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2006. – С. 3–5.
5. *Становский А. Л., Лысенко Т. В., Носенко Т. И.* Синхронизация событий при работе систем автоматизированного управления // Материалы XIV семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2007. – С. 43–45.

Надійшла 28.03.07
Після доробки 15.06.07

Визначено поняття «подія» у теорії синхронізуючого керування, як пойменований стан. Виконано класифікацію подій. Запропоновано метод нейросеточної екстраполяції дискретних числових тимчасових трендів, заснований на заміні значень тренда у вузлових крапках на значення похідної інтерполяційного полінома в цих же крапках.

A concept of «event» is defined in synchronizing control theory as nominal condition. Classification of events is maid. A method of a neuron grid extrapolation of discrete numerical temporal trends based on trend value replacement in nodal points by interpolation polynom derivative in the same points is suggested.