

УДК 62-52.087:621.74

А.Л. Становский, д-р. техн. наук, проф.,
Т.В. Лысенко, канд. техн. наук, доц.,
Одес. нац. политехн. ун-т

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУАР-ЭФФЕКТА ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ СОБЫТИЙ

О.Л. Становський, Т.В. Лисенко. Використання муар-ефекту при управлінні процесами синхронізації подій. Описано основні підходи до нового виду управління процесами синхронізації подій. Наведено експериментальні дані, які підтверджують гіпотезу про високу чутливість до муар-ефекту в такому управлінні. Запропоновано методи використання муар-ефекту для підвищення якості управління.

A.L. Stanovsky, T.V. Lysenko. Application of moire-effect in events synchronization process control. The main principles of a new kind of events synchronization processes management are presented. The experimental data, confirming a hypothesis about high sensitivity to moire-effect in such control, are presented. The methods of moire-effect application for improvement of control quality are offered.

Современная теория автоматического управления насчитывает, в зависимости от целей, шесть основных видов: стабилизирующее, программное, следящее, экстремальное, оптимальное и адаптивное [1]. В то же время, существует цель управления, недостижимая ни одним из перечисленных видов. Эта цель принципиально иная — обеспечить совпадение (или несовпадение) во времени некоторых событий, происходящих в объекте управления.

Постановка такой задачи связана с существованием объектов, основная внешняя отличительная черта которых — результаты их “деятельности” при практически равных условиях и малых внешних и внутренних возмущениях малопредсказуемы, так как зависят, в основном, не от этих условий и возмущений, а от самого факта совпадения событий. Еще одно существенное отличие — состояния и выходы объекта изменяются скачкообразно, так как являются следствием двоичности совпадения: 1 — есть синхронизация событий; 0 — нет синхронизации.

Пусть объект управления описан уравнением в частных производных

$$A[\partial \mathbf{x}(z, \tau) / \partial \tau] = \mathbf{f}[\mathbf{x}(z, \tau); \partial \mathbf{x}(z, \tau) / \partial z; \partial^2 \mathbf{x}(z, \tau) / \partial z^2; \mathbf{u}(z, \tau)], \quad (1)$$

где z — пространственная координата;

τ — время;

$\mathbf{x}(z, \tau)$ — n -мерный вектор состояния;

$\mathbf{u}(z, \tau)$ — m -мерный вектор управления,

A — матричная функция размерности $n \times n$ [2].

Разделим объект на p подсистем: $\mathbf{x}_1(z, \tau) \in \mathbf{x}(z, \tau)$; $\mathbf{x}_2(z, \tau) \in \mathbf{x}(z, \tau)$; ...; $\mathbf{x}_p(z, \tau) \in \mathbf{x}(z, \tau)$, которые могут частично пересекаться между собой. Каждая из подсистем движется в пространстве своих состояний под действием управлений $\mathbf{u}_1(z, \tau) \in \mathbf{u}(z, \tau)$; $\mathbf{u}_2(z, \tau) \in \mathbf{u}(z, \tau)$; ...; $\mathbf{u}_p(z, \tau) \in \mathbf{u}(z, \tau)$, которые могут не только пересекаться, но и полностью совпадать друг с другом или с генеральным множеством $\mathbf{u}(z, \tau)$.

Зададим общее для всех подсистем единое начальное $\mathbf{x}(z, 0) = \mathbf{x}_0$ и p конечных $\mathbf{x}_1(z, \tau_{s1})$; $\mathbf{x}_2(z, \tau_{s2})$; ...; $\mathbf{x}_p(z, \tau_{sp})$ состояний, интерпретируемых как “события S_1, S_2, \dots, S_p ”, соответственно.

Задача синхронизации событий сводится в этом случае к достижению с помощью управлений $\mathbf{u}_1(z, \tau) \in \mathbf{u}(z, \tau)$; $\mathbf{u}_2(z, \tau) \in \mathbf{u}(z, \tau)$; ...; $\mathbf{u}_p(z, \tau) \in \mathbf{u}(z, \tau)$ такого состояния $\mathbf{x}(z, \tau_s)$, при котором для всех p подсистем выполняется соотношение

$$|\tau_{si} - \tau_s| \leq \varepsilon_i; \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

где ε_i — малые числа.

Если неравенства (2) рассматривать как зависимости между отдельными координатами вектора конечного состояния, то управление событиями можно представить как частный случай трансверсального управления.

Для систем с распределенными параметрами, состоящих из двух подсистем ($p=2$) и управляемых единым $\mathbf{u}(z, \tau)$, задача сводится к достижению условия

$$\tau_{s1}[\mathbf{x}_1(z, \tau); \mathbf{u}(z, \tau)] - \tau_{s2}[\mathbf{x}_2(z, \tau); \mathbf{u}(z, \tau)] \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где ε — малое число.

Объекты подобного рода встречаются во многих видах человеческой деятельности. Приведем примеры из литейного производства. Наиболее яркий из них — флотационная очистка поверхности отливок от окисных плен при литье в керамические формы [3]. При использовании этого процесса чистая, неокисленная поверхность металла получается только при совпадении во времени моментов всплытия газового пузыря, уносящего с поверхности окисную плену, и начала кристаллизации отливки. Если этого совпадения нет, то никакими изменениями параметров процесса (естественно, в пределах технологических возможностей) добиться качественной отливки невозможно.

Обеспечить стабильность подобного совпадения обычными технологическими методами весьма трудно, поэтому при изготовлении отливок в керамических формах отмечается высокое количество брака и отсутствие видимой связи между практически неизменяющимися условиями литья и качеством отливок. Такое “странное” поведение объекта объясняется так называемым *муар-эффектом* [4], когда небольшие изменения приводят к значительным последствиям только при наличии двух, пересекающихся под малым углом характеристик объекта управления.

На рис. 1, а в координатах $\{u, \tau_s\}$ изображены два отрезка, причем отрезок 1' получен путем аффинного переноса отрезка 1 на величину $\Delta\tau_s$ вниз (по рисунку). При малом $\Delta\tau_s$ прямые расположены настолько близко друг к другу, что для многих практических приложений их можно считать совпадающими. Это может означать, например, что незначительное изменение некоторого параметра процесса не сказывается заметно на его результатах.

Иная картина наблюдается, если ввести в рассмотрение еще один отрезок прямой 2 (рис. 1, б), пересекающий отрезки 1 и 1' в точках О и О' и образующий с ними малый угол α . Благодаря наличию отрезка 2 результат малого перемещения отрезка 1 становится гораздо заметнее: точки О и О' отстоят друг от друга на расстоянии Δu , значительно (на порядки при малом α) превышающем породившее его изменение $\Delta\tau_s$, что является следствием очевидного геометрического соотношения

$$\Delta u = \frac{\Delta\tau_s}{\operatorname{tg}\alpha}.$$

Пусть линии 1 и 2 — графики зависимости времени наступления некоторых событий τ_{s1} и τ_{s2} от u , а величина u^* — управление, синхронизирующее события в подсистемах 1 и 2 некоторого объекта управления. Пусть также на объект действует малое стохастическое возмущение, переводящее прямую 1 в положение 1'. Это возмущение отбрасывает объект далеко от точки синхронизации, намного изменяя ситуацию в нем.

Описанное подтверждает следующее положение: *в тех случаях, когда результат процесса определяется не абсолютными значениями его параметров, а самим фактом совпадения (синхронизации) событий в его подсистемах, подобное малое возмущение, благодаря муар-эффекту, может существенно и непредсказуемо изменить конечный результат.*

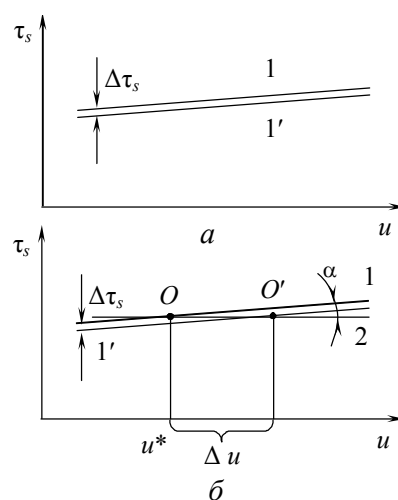


Рис. 1. Схема к объяснению влияния муар-эффекта на состояние объекта управления событиями

Теперь, чтобы восстановить синхронизацию, необходимо, например, значительно изменить исходное управление u^* на относительно большую величину Δu (см. рисунок 1), что в реальных объектах не всегда бывает возможным.

Высокую чувствительность выхода к малым изменениям входа и возмущений при событийном характере формирования результатов процесса подтверждает также и поверхность отливки из стали 35Л, полученной в оболочковой форме на смоляном связующем (рис. 2). При сравнительно небольших размерах ($0,2 \times 0,2 \times 0,02$ м), малой продолжительности заливки (до 5 с), единых условиях формообразования можно утверждать, что условия формирования состояния поверхности при изготовлении этой отливки были практически одинаковыми. Тем не менее, на поверхности отливки присутствуют в некоторой степени сразу три концентрические зоны: в центре — пригар, далее — кольцеобразный участок чистой поверхности и, наконец, — газовые раковины!

Попробуем объяснить это явление с точки зрения событийного подхода к образованию дефектов. Для этого воспользуемся известными данными о том, что газовые раковины образуются при совпадении событий: S_1 — “отливка жидкая” и “давление газов в рабочем слое оболочковой формы менее 20 Па над атмосферным”; S_2 — “температура отливки немного ниже температуры ликвидуса сплава” и “давление газов в рабочем слое оболочковой формы превышает 200 Па над атмосферным” [5]. Температура отливки рассчитывается непосредственно по формуле [6]

$$T_{\text{отл}} - T_0 = (T_{\text{зал}} - T) \left(1 - \frac{2b_{\phi} \sqrt{\tau}}{c_{\text{м}} \rho_{\text{м}} h \sqrt{\pi}} \right), \quad (4)$$

где $T_{\text{отл}}$ — температура металла отливки;
 T_0 — начальная температура;
 $T_{\text{зал}}$ — температура заливки;
 b_{ϕ} — коэффициент теплоаккумуляции материала формы;
 $c_{\text{м}}$ — коэффициент теплоемкости материала отливки;
 $\rho_{\text{м}}$ — плотность металла;
 h — толщина отливки.

Если принять, что форма заполняется металлом мгновенно, то распространение тепла внутрь ее стенки будет приблизительно (с точностью до температурной зависимости теплофизических характеристик материала формы) описываться уравнением Фурье

$$\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \tau} = a_{\phi} \frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial z^2} \quad (5)$$

при следующих краевых условиях:

$$T_{\phi}(z, 0) = T_0; \quad T_{\phi}(0, \tau) = T_{\text{отл}}; \quad \partial T_{\phi}(\infty, \tau) / \partial z = 0; \quad T_{\phi}(\infty, \tau) = T_0,$$

где T_{ϕ} — текущая температура внутри формы ($T_{\phi} = T_{\phi}(z, \tau)$);
 z — координата вдоль оси, направленной перпендикулярно рабочей поверхности формы;
 a_{ϕ} — температуропроводность материала формы.

Совместное решение уравнения (5) и условий заполнения формы металлом

$$\tau_r = r^2 \frac{\pi h}{v_{\text{зал}} S}, \quad (6)$$

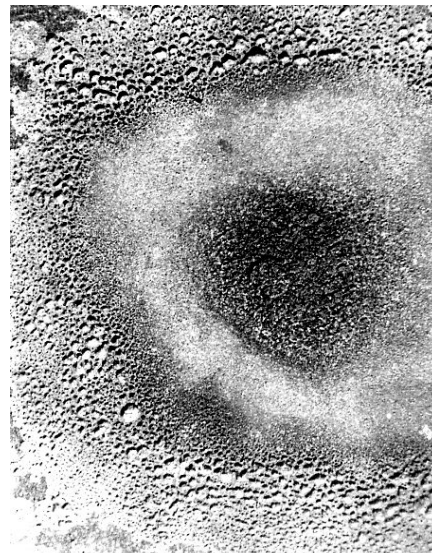


Рис. 2. Поверхность стальной отливки, полученной в песчано-смоляной форме

позволило получить уравнение прогрева формы с момента начала заливки

$$T_d = T_{отл} - \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{\frac{a\left(\tau_s - r^2 \frac{\pi h}{v_{зал} S}\right)}{x_d^2}}}(T_{отл} - T_0), \quad (7)$$

где τ_r — время, необходимое жидкому металлу, чтобы достичь точек, отстоящих от центра отливки (оси z) на величину r (транспортное запаздывание);

$v_{зал}$ — скорость заливки;

S — площадь сечения питателя;

x_d — глубина дегазации формы теплом отливки.

Подставляя в (7) конкретные значения условий заливки детали, изображенной на рисунке 2: $T_d = 650$ К; $T_m = 1823$ К; $T_0 = 300$ К; $a = 6,24 \cdot 10^{-7}$ м²·с; $v_{зал} = 0,1$ м/с; $h = 0,02$ м; $S = 4 \cdot 10^{-4}$ м²; $x_d = 0,005$ м, после соответствующих преобразований получим

$$\tau_s = 55 \cdot 10^4 x_d^2 + 523 r^2, \text{ с.} \quad (8)$$

Графики функции $\tau_s(r)$ при различных x_d приведены на рис. 3. Как видно из (8) и из рисунка время наступления событий S_1 — достижение глубины дегазации 0,004 м и S_2 — достижение глубины дегазации 0,0045 м зависит от расстояния от центра отливки.

Здесь же приведен график $\tau_{s3}(r)$ — времени достижения события S_3 “температура металла равна температуре ликвидуса”, построенный по (4). Эта переменная от расстояния до центра отливки не зависит. Точка O_1 совпадения во времени событий S_1 и S_3 соответствует границе между пригаром и чистой поверхностью, а точка O_2 совпадения во времени событий S_2 и S_3 — границе между чистой поверхностью и зоной газовых раковин. В итоге, по результатам расчета на поверхности отливки должны существовать все три зоны, что и подтверждает рисунок 2.

Уравнение (8) показывает значительно большую зависимость τ_s от глубины дегазации формы. Так, значения глубины дегазации, использованные в приведенных расчетах, близки. Это подтверждает гипотезу о чрезвычайной чувствительности результатов управления событиями к муар-эффекту. Именно поэтому отливка, представленная на рисунке 2, — весьма редкое явление. Чаще всего, в результате экспериментов при описанных условиях получались отливки, пораженные либо пригаром, либо газовыми раковинами.

Учет событийности в механизме образования дефектов при литье стальных отливок в оболочковых формах позволил, основываясь на муар-эффекте, предложить ряд мероприятий по снижению брака литья. В частности, главным выводом является: обоснованная этим эффектом повышенная чувствительность ведет к нестабильности процесса литья. Повышение качества управления в этом случае возможно путем снижения значения коэффициента перед x_d в (8). Для этого необходимо применять технологические методы и, прежде всего, повышение коэффициента температуропроводности формы a за счет, например, добавок в формовочную смесь при применении дифференцированного уплотнения и т.п.

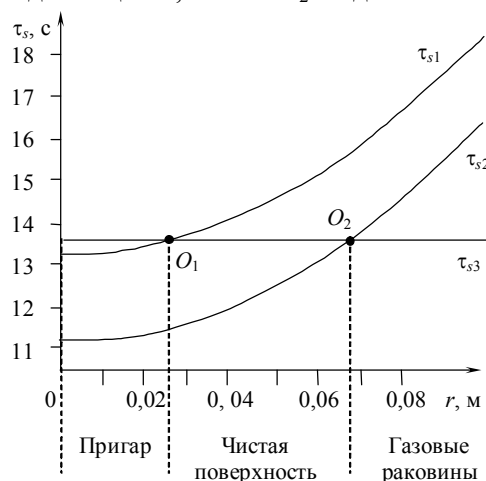


Рис. 3. Результаты расчетов, объясняющие вид поверхности отливки, изображенной на рисунке 2

Литература

1. Бабаков Н.А. Теория автоматического управления. Ч. 1 / Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др. — М.: Высш. шк., 1986. — 367 с.
2. Рей У. Методы управления технологическими процессами. — М.: Мир, 1983. — 368 с.
3. Бабилунга А.В. Флотационный метод очистки поверхности отливок / Бабилунга А.В., Кострова Г.В., Становский А.Л. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1996. — № 1. — С. 23 — 26.
4. Маковецкий П.В. Смотри в корень! — М.: Наука, 1979. — 384 с.
5. Серебро В.С. Особенности формирования стальной отливки в оболочковой форме // Литейн. пр-во. — 1977. — № 8. — С. 5 — 8.
6. Баландин Г.Ф. Основы теории охлаждения отливки. Ч. 1. — М.: Машиностроение, 1976. — 328 с.

Поступила в редакцию 27 марта 2006 г.
