

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕХАНООБРАБОТКИ

НОВИЧИХИНА Е. Р., канд. техн. наук, доц. КУРЧ Л. В.

Белорусский национальный технический университет

Для прогнозирования показателей функционирования проектных вариантов производственных систем (ПС) механообработки широко используются регрессионные зависимости (РЗ), полученные по результатам имитационного эксперимента. Вывод и использование РЗ сопряжены с определенными проблемами. Во-первых, РЗ пригодны только для конкретного объекта и условий, так как наследуют частный характер исходной имитационной (ИМ) модели и проведенного эксперимента. Во-вторых, известные РЗ ПС недостаточно адекватны, потому что ограничиваются учетом небольшого числа факторов, обычно до трех.

Целью исследования является повышение универсальности и адекватности регрессионных моделей производственных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать универсальную ИМ ПС в качестве объекта эксперимента;
- предложить методику уменьшения размерности имитационного эксперимента с сохранением охвата всех значимых факторов и без существенной потери точности;
- получить универсальные РЗ, справедливые для всего диапазона исходных данных ПС.

Универсальность РЗ напрямую связана с универсальностью исходной ИМ. Основу универсальной ИМ должны составлять система показателей, структурные элементы и этапы процесса, которые являются общими абсолютно для всех ПС. В [1] показано, что такой основой может служить объемный временной баланс основного технологического оборудования рабочих позиций (РП) ПС:

$$T_{\phi} = \sum T_i = T_3 + T_{o.p} = T_{\text{маш}} + T_{\text{пр}} + T_{o.p}, \quad (1)$$

где  $T_{\phi}$  – фонд времени оборудования за интересующий период;  $T_i$  – суммарное время нахождения оборудования в  $i$ -м состоянии за период  $T_{\phi}$ ;  $T_3$  – то же загрузки оборудования работой (наличия заказов);  $T_{\text{маш}}$  – суммарное машинное время обработки;  $T_{\text{пр}}$  – суммарное время простоев по различным причинам при наличии работы;  $T_{o.p}$  – то же отсутствия работы (заказов).

Моделирование должно быть нацелено прежде всего на определение доли продуктивной составляющей в фонде оборудования, которую можно оценить коэффициентом использования оборудования по машинному времени  $K_{\text{маш}} = T_{\text{маш}}/T_{\phi}$ . Имея  $K_{\text{маш}}$ , можно после моделирования прямым счетом определить главные показатели функционирования ПС, такие как среднюю производительность  $U$ , среднюю выработку  $N$  и среднюю длительность производственного цикла выполнения заказа  $T_{\text{ц}}$ :

$$U = [(1/t_{\text{маш}})K_{\text{маш}}W_{\text{РП}}]/W_{\text{оп}}60 \text{ (шт./ч);}$$

$$N = UT_{\phi} \text{ (шт.);}$$

$$T_{\text{ц}} = [(t_{\text{маш}}Q)/K_{\text{маш}}/W_{\text{дубл}} + T_{\text{ож.зап}}]W_{\text{оп}}/60 \text{ (ч),}$$

где  $t_{\text{маш}}$  – среднее машинное время обработки, мин;  $W_{\text{РП}}$  – количество обрабатываемых рабочих позиций в ПС;  $W_{\text{оп}}$  – среднее количество операций в технологическом маршруте;  $Q$  – средний размер партии запуска;  $W_{\text{дубл}}$  – средняя кратность дублирования РП при диспетчировании;  $T_{\text{ож.зап}}$  – среднее время нахождения операционной партии в ожидании запуска, мин.

Учитывая сказанное, в РЗ можно ограничиться только одним определяемым показате-

лем  $K_{\text{маш}}$ . Кроме среднего значения этой случайной величины  $\bar{X}$ , откликами эксперимента будут коэффициенты ее вариации ( $V = \sigma/\bar{X}$ , где  $\sigma$  – стандартное отклонение), асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$ .

Для аналитического определения  $K_{\text{маш}}$  достаточно рассмотреть период  $T_{\text{ф}}$ , равный длительности производственного цикла операционной партии:

$$t_{\text{ц}} = [(t_{\text{маш}} + t_{\text{у-с}} + t_{\text{изм}} + t_{\text{т.о}} + t_{\text{о.о}} + t_{\text{отд}} + t_{\text{нак}})Q_{\text{т}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{схр}}]Q/Q_{\text{т}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{орг}} + t_{\text{о.р}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{маш}}$  – время машинное (работа по управляющей программе);  $t_{\text{у-с}}$  – время установки, снятия и закрепления детали;  $t_{\text{изм}}$  – время измерений;  $t_{\text{т.о}}$  – время технического обслуживания в процессе обработки;  $t_{\text{о.о}}$  – время организационного обслуживания в течение смены;  $t_{\text{отд}}$  – время на отдых и естественные надобности;  $t_{\text{нак}}$  – время простоя при приемке-выдаче локального накопителя;  $t_{\text{тр}}$  – то же при транспортном обслуживании;  $t_{\text{схр}}$  – то же из-за неполной синхронизации со смежными операциями (голодание, блокировка);  $t_{\text{пер}}$  – время переналадки (подготовительно-заключительное);  $t_{\text{рем}} = t_{\text{маш}}Q(T_{\text{в.р}}/T_{\text{н.о}})$  – время ремонта РП, приведенное к  $t_{\text{ц}}$ ;  $T_{\text{в.р}}$  – среднее время восстановления работоспособности;  $T_{\text{н.о}}$  – время наработки на отказ;  $t_{\text{орг}}$  – время простоя по организационным и прочим причинам;  $t_{\text{о.р}} = t_{\text{нел}} + t_{\text{ож}}$  – время отсутствия работы, вызванное недостаточностью заказов в плане или ожиданием плановых заказов из-за неритмичности их поступления;  $Q_{\text{т}}$  – размер транспортной партии. Аналитическая модель (2) исходит из допущения о независимости потоков событий в ПС, что не соответствует действительности. Модель учитывает состояние оборудования, но не отражает этапы прохождения операционных партий через него. Кроме того, модель (2) требует исходных данных, которые на этапе проектирования отсутствуют. Эти недостатки устраняются при переходе к имитационному моделированию.

На рис. 1 представлена обобщенная схема имитации функционирования РП. Здесь для обозначения состояний используются те же сокращения, что и в комментариях к (2). Сплошными стрелками показан основной поток деталей, штрих-пунктирными – потоки прерываю-

щих «плохих» заявок, пунктирными – условия. Всего потребуется 13 генераторов случайных чисел для времен пребывания РП в состояниях и 1 – для значения  $Q$ .

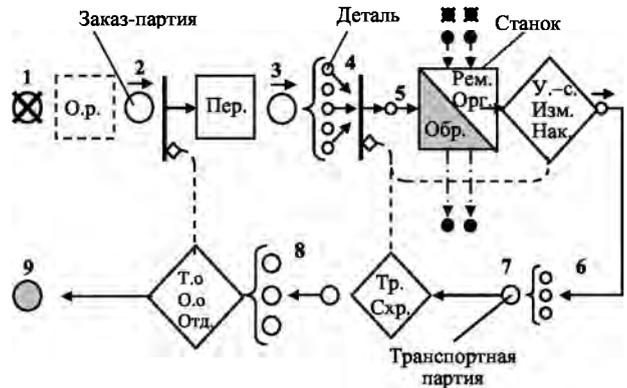


Рис. 1. Схема функционирования РП: О.р. – отсутствие работы; Пер. – переналадка; Рем. – ремонт; Орг. – организационные простои; Обр. – обработка; У.-с. – установка-снятие; Изм. – измерение; Нак. – простой, связанный с работой накопителя; Тр. – транспортный простой; Схр. – простой из-за неполной синхронизации

Обратимся теперь к факторам, которые должны присутствовать в РЗ. Задача учета всех значимых факторов до сих пор не находит удовлетворительного решения из-за большой размерности и неприемлемой трудоемкости эксперимента [1].

Во-первых, широк состав показателей функционирования. Для ПС можно выделить более 20 типов таких показателей. Во-вторых, широк состав самих факторов. Для ПС список значимых факторов превышает 50 позиций, а их задание требует более 100 типов числовых параметров. В-третьих, требуется относительно много уровней варьирования каждого фактора. Влияние многих факторов нелинейное, а для некоторых описывается полиномом третьей степени. В этих условиях число уровней варьирования должно быть не менее четырех, а количество опытов в полном факторном эксперименте только для шести факторов составит:  $W_{\text{оп}} = q^k = 4^6 = 4096$ , где  $k$  – число факторов;  $q$  – число уровней. В-четвертых, требуется значительное время моделирования в каждом прогоне ИМ до достижения ПС стационарного режима работы. Например, для ИМ, учитывающей 13 состояний станка в ПС, и для граничных значений параметров переходный период составляет приблизительно  $2 \cdot 10^7$  мин, что требует около 8 ч работы персонального компьютера со сред-

ней производительностью (Intel Core Duo, 2 ГГц, 1024 МБ). В-пятых, требуются большие объемы выборки в каждой точке плана эксперимента из-за значительной дисперсии результатов ИМ ПС. Например, если закон распределения выходной величины  $K_{\text{маш}}$  неизвестен, то согласно неравенству Чебышева для получения точности 0,015 с доверительной вероятностью 95 % потребуется число повторений каждого опыта  $n = 80\text{--}440$  в зависимости от условий.

Для уменьшения числа варьируемых факторов в РЗ необходимо прибегнуть к их интегральным и относительным оценкам, для чего обратимся к (1). Выход продукции определяется только составляющей  $T_{\text{маш}}$ , поэтому в качестве фактора РЗ параметр  $t_{\text{маш}}$  должен присутствовать обязательно. В качестве фактора, учитывающего составляющую  $T_{\text{о.р.}}$ , может быть использован традиционный параметр ПС – коэффициент загрузки  $\rho$ . При неизменном  $T_{\text{ф}}$  и заданном  $\rho$  сокращение выхода продукции ПС будет определяться соотношением  $T_{\text{пр}}$  и  $T_{\text{маш}}$ . Причем важно только суммарное время простоев, вне зависимости от их конкретного распределения по причинам. Поэтому все факторы, связанные с простоями, можно учесть одним интегральным параметром, который назовем коэффициентом простоев:  $C_{\text{пр}} = \sum t_{\text{пр}(i)} / t_{\text{маш}}$ , где  $t_{\text{пр}(i)}$  – время простоя по  $i$ -й причине, приходящееся на одну деталь. Согласно (2) таких причин будет 11.

На дисперсию результатов решающее значение оказывает степень случайности исходных данных, а именно – доля случайной составляющей в них и ее закон распределения. Для единообразного учета этого фактора введем понятие коэффициента относительного смещения минимального значения случайных величин от нуля  $C = X_{\text{min}} / X_{\text{ср}}$ . Значение  $X_{\text{min}}$  характеризует постоянную составляющую величины. Например,  $C = 1$  означает, что величина детерминирована,  $C = 0$  – что случайна во всем диапазоне.

Для дальнейшего сокращения требуемого числа опытов воспользуемся методическим приемом, широко применяемым в других инженерных областях, например при определении режимов резания. Суть его заключается в следующем. В эксперименте и выводимых эмпи-

рических зависимостях участвует небольшое число наиболее значимых и только взаимозависимых факторов. По остальным факторам приняты фиксированные значения, отражающие некоторые типичные условия, которые условно считались «нормальными». Результаты, полученные по РЗ для «нормальных» условий, приводятся к конкретным условиям при помощи соответствующих поправочных коэффициентов  $k_j$ . Эти коэффициенты отражают влияние независимых факторов и определяются по отдельности также в серии экспериментов, но уже однофакторных. Таким образом удастся охватить все факторы без полного перебора их возможных сочетаний.

Введем понятие и параметры «нормальных условий» для ИМ ПС: анализируемый период – один месяц работы в две смены ( $T'_{\text{мод}} = 2 \cdot 10^4$  мин);  $\rho' = 2/3 = 0,66667$ ;  $Q' = 200$  шт.;  $Q'_t = 20$  шт.;  $t'_{\text{маш}} = 1$  мин;  $C'_{\text{пр}} = 1$ ; закон распределения случайных величин ( $Q$  и  $t$ ) – экспоненциальный;  $C = 2/3 = 0,66667$  (кроме промежутков времени между поступлениями заказов, отказами и организационными простоями, для которых принимается  $C = 0$ ).

Для назначения системы базисных функций в РЗ каждого отклика проводилось предварительное моделирование.

Перечисленные мероприятия позволили сократить число опытов в эксперименте с зависимыми факторами до  $W_{\text{оп}} = 4^3 = 64$ . Еще 12 опытов потребовалось для независимых факторов.

Для сокращения объема выборки (числа повторений каждого опыта) было принято допущение о нормальном законе распределения выходных случайных величин согласно центральной предельной теореме Ляпунова. Дальнейшее моделирование подтвердило справедливость этого допущения. Оно позволило сократить объемы выборки до  $n = 20\text{--}84$  в зависимости от значений стандартного отклонения  $\sigma$  для данных условий, которое определялось по результатам предварительных прогонов ИМ.

В результате проведенных исследований были получены следующие РЗ.

Среднее значение величины  $K_{\text{маш}}$  для анализируемого периода  $T$  работы ПС

$$K_{\text{маш}(T)} = K_{\text{маш}(\infty)} k_T = \rho / (1 + C_{\text{пр}}) k_T, \quad (3)$$

где  $K_{\text{маш}(\infty)}$  – значение  $K_{\text{маш}}$  для установившегося режима ( $T \rightarrow \infty$ ) работы ПС;  $k_T = 1 - 0,077 (T'/T)^{1/2}$  – коэффициент приведения к анализируемому периоду  $T$ .

Коэффициент вариации величины  $K_{\text{маш}}$  для «нормальных» условий:

$$V' = 0,3898 + 0,0014Q - 0,7535\rho - 0,4277C - 5,904 \cdot 10^{-7} Q^2 + 0,4449\rho^2 + 0,198C^2 + 1,2609 \cdot 10^{-11} Q^3. \quad (4)$$

Если рассчитанное по (4) значение оказывается вне диапазона  $0,05 \geq V' \geq 1$ , то следует принять  $V'$  равным ближайшему граничному значению нормативно.

Для общего случая коэффициент вариации определяется следующим образом:

$$V_{(T)} = V' k_T k_t k_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где  $k_T = (T'/T)^{1/2}$  – коэффициент приведения к анализируемому периоду  $T$ ;  $k_t = (t_{\text{маш}}/t'_{\text{маш}})^{1/3}$  – то же по трудоемкости;  $k_{\text{пр}} = (C_{\text{пр}}/C'_{\text{пр}})^{1/3}$  – то же по номинальным простоям.

Коэффициент асимметрии величины  $K_{\text{маш}}$

$$A = 1,095 + 0,001982Q - 1,885\rho + 1,201C - 8,059 \cdot 10^{-7} Q^2 + 0,3537\rho^3 - 2,921C^2. \quad (6)$$

Коэффициент эксцесса величины  $K_{\text{маш}}$

$$E = 4,016 - 7,867\rho - 6,882C + 3,46\rho^2 + 11,1C^2. \quad (7)$$

Отметим, что по сравнению с (3)–(5) зависимости (6) и (7) достаточно грубые. Они позволяют определить только знак параметра и

оценить его значение с точностью всего до целых. Этого достаточно, чтобы представить характер кривой. Например: округленное значение  $A \geq 2$  будет означать, что закон скорее близок к экспоненциальному,  $E \leq -2$  – к равномерному,  $E \geq 10$  – к детерминированному.

Все РЗ справедливы в следующих диапазонах исходных данных:  $t_{\text{маш}} = [0,2; 125]$  мин;  $\rho = [0,05; 1]$ ;  $Q = [1; 2000]$  шт.;  $C = [0; 1]$ ;  $C_{\text{пр}} = [0,2; 20]$ ;  $T \geq 4,8 \cdot 10^2$  мин (не менее одной недели работы в две смены). Адекватность РЗ проверялась по критерию Фишера и коэффициенту детерминации  $[R^2] \geq 0,75$ . Ошибка аппроксимации регрессии по среднему значению  $K_{\text{маш}}$  составляет 0,02 с доверительной вероятностью 0,95. Общая ошибка с учетом погрешности экспериментальных откликов составляет 0,035.

Областью практического применения полученных результатов является проектирование вновь создаваемых и модернизируемых ПС механообработки.

## ВЫВОД

Главные показатели функционирования любой ПС могут быть рассчитаны аналитически при наличии параметра  $K_{\text{маш}}$ , значение и параметры закона распределения которого определяются найденными регрессионными зависимостями (3)–(7).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новичихин, Р. В. Моделирование производственных систем обработки деталей в машино- и приборостроении / Р. В. Новичихин, Е. Р. Новичихина. – Минск: БНТУ, 2010. – 309 с.

Поступила 07.07.2010