MPRA
Munich Personal RePEc Archive

To the question of similarity of technological processes of production and technical systems

, and , and ,

Karazin Kharkiv National University, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Karazin Kharkiv National University

9 February 2011

Online at https://mpra.ub.uni-muenchen.de/96362/
MPRA Paper No. 96362, posted 05 Oct 2019 14:02 UTC

УДК658.51.012

Н.А.Азаренков, О.М.Пигнастый, В.Д.Ходусов

К вопросу подобия технологических процессов производственно-технических систем

Для изучения технологических процессов производственно-технических систем вводится целый ряд понятий, которые заданы и определены с помощью чисел [1]. При решении производственно-технологических задач исследователи встречаются с непреодолимыми математическими трудностями [2]. В этих случаях главную роль играют экспериментальные методы исследования, позволяющие установить простейшие опытные факты. В ходе эксперимента исследуемый технологический процесс моделируется простым технологическим процессом. Подход, при котором для изучения функционирования крупного предприятия используют небольшое предприятие, проведение исследований на котором обошлось бы дешевле [3], выглядит заманчиво. Широкую известность получили «экономические эксперименты» в Щекинском объединении «Азот», «Главмосавтотрансе» [4] и на Львовском телевизионном заводе «Львов» [5], целью которых являлся анализ методов управления технологическими процессами для повышения эффективности деятельности предприятий. При этом возникал вопрос о том, насколько подобны экспериментальные производственно-техническими системы и системы, на которые происходит перенос и внедрение результатов исследования.

Постановка экспериментов позволяет установить общие закономерности для разных производственно-технических систем. Для практических исследований важно выбрать правильно безразмерные параметры. Требуется, чтобы число их было минимальным, а взятые параметры должны отражать в наиболее удобной форме основные эффекты исследуемых технологических процессов. Грамотная постановка и обработка экспериментальных данных немыслима без учета вопросов подобия и размерности. Более того, в начальной стадии изучения некоторых сложных явлений производственно-технических систем теория подобия является единственно возможным теоретическим методом, может привести к довольно существенным результатам. Особенно ценно то, что с помощью теории подобия можно получить важные результаты при рассмотрении процессов, которые зависят от большого количества параметров, но при этом так, что некоторые из этих параметров в известных случаях становятся несущественными [6]. Вопросам подобия технологических процессов производственно-технических систем, функционирование которых определяется большим количеством технологическим и технических параметров, посвящена настоящая работа.

Процесс изготовления предмета труда есть логически упорядоченный набор технологических операций, при выполнении которых на предмет труда переносится стоимость производственно-технологических ресурсов путем целенаправленного воздействия технологического оборудования [7]. На каждой операции неизбежно появляются колебания геометрических характеристик, физико-механических свойств материалов, которые обусловлены комплексом действующих в производстве случайных и систематических факторов. Они вызывают отклонения параметров, описывающих состояние предмета труда после выполнения технологической операции. Степень соответствия параметров предметов труда после технологической операции установленным допускам определяет технологическую точность выполнения операции. В результате возникновения случайных погрешностей при технологической обработке контролируемый параметр является случайной величиной.

Таким образом, технологический процесс производственно-технической системы в результате воздействия на предметы труда технологического оборудования представляет собой случайный процесс перехода предметов труда из одного состояния в другое.

Состояние системы определяется как состояние числа N предметов труда производственно-технической системы [8]. Состояние предмета труда в момент времени t может быть представлено координатами в фазовом технологическом пространстве [5,9]. Этими координатами являются сумма затрат S_{j} (грн), перенесенных на j-й предмет труда в ходе выполнения технологических операций и интенсивность переноса затрат μ_j (грн/час) от технологического оборудования на j-й предмет труда, 0<j<N. Координаты S_{j} и μ_j определяют в фазовом технологическом пространстве технологические траектории предметов труда $\mathrm{S}_{\mathrm{j}} = \mathrm{S}_{\mathrm{j}}(t)$ [8,9]. В ходе технологического процесса предмет труда обязан быть изготовлен в соответствии с заданной технологией производства. Отклонение от технологии считается недопустимым. Каждая технологическая операция характеризуется рабочими параметрами технологического оборудования, квалификацией технологического персонала, нормами потребления производственно-технологических ресурсов (сырья, материалов, комплектующих, фонда оплаты труда, энергоресурсов), что определяет закон переноса производственно-технологических ресурсов на предмет труда. Интенсивность μ передачи затрат $\Delta S = \Delta S(t)$ от средств труда (технологического оборудования) на предмет труда за время выполнения технологической операции Δt является случайным процессом [5,9], значение которого в фиксированный момент времени определяется случайной величиной:

$$\mu = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}, \tag{1}$$

Состояние системы в некоторый момент времени будет определено, если определены микропараметры S_{j} и μ_j, а в любой другой момент времени найдено из уравнений состояния параметров j-го предмета труда:

$$\frac{dS_j}{dt} = \mu_j, \qquad \frac{d\mu_j}{dt} = f_j(t, S), \tag{2}$$

где $f_j(t, S)$ - производственная функция производственно-технической системы. Если количество предметов труда много больше единицы, то решить систему (2) из 2N - уравнений практически невозможно, что требует переход от микроописания производственно-технической системы к макроописанию с элементами вероятностной природы. Основная трудность в таком описании состоит в том, чтобы выделить характеристики состояний предметов труда, которые можно было бы измерить на микроуровне описания предприятия. Вместо рассмотрения состояния предметов труда производственно-технической системы с параметрами S_{j} и μ_j, введем в фазовом технологическом пространстве $(\mathrm{t}, \mathrm{S}, \mu)$ нормированную функцию распределения $\chi(t, S, \mu)$ предметов труда по состояниям:

$$\int_0^{\infty} d\mathrm{S} \cdot \int_0^{\infty} d\mu \cdot \chi(t, S, \mu) = N. \tag{3}$$

Каждая точка в данном пространстве будет задавать состояние предмета труда. Разобьем фазовое пространство на такое число ячеек, чтобы размеры ячейки $\Delta\Omega = \Delta\mathrm{S} \cdot \Delta\mu$ были много меньше значений характерных параметров производственно-технической системы и в то же время содержали внутри себя большое число предметов труда. Вместо того, чтобы фиксировать точные значения параметров предметов труда, будем приближенно характеризовать состояние производственно-технической системы числом предметов труда в ячейке $\Delta\Omega$. Если размеры ячейки достаточно малы, то приближенное описание будет нести в себе почти столь же подробную информацию, что и точное. Таким образом, мы приходим к необходимости наряду с основным пределом при $N \to \infty$ рассматривать и предельный случай стремящихся к нулю размеров ячейки. В силу того, что величина $\chi(t,S,\mu)\cdot d\Omega$ представляет собой число предметов труда в бесконечно малой ячейке $\Delta\Omega$ фазового технологического пространства, мы можем по изменению фазовой координаты S и фазовой скорости μ, определяющих состояние предмета труда в ячейке фазового технологического пространства, судить и об изменении самой функции $\chi(t,S,\mu)$:

$$\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial t}+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial S}\cdot\mu+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial\mu}\cdot f(t,S)=J(t,S,\mu), \qquad (4)$$

$$\frac{dS}{dt}=\mu; \qquad \frac{d\mu}{dt}=f(t,S), \qquad (5)$$

Уравнение (5) описывает изменение усредненных по бесконечно малой ячейке фазового технологического пространства $\Delta\Omega$ характеристик предметов труда S_j, μ_j. Функция $\mathrm{J}(t,S,\mu)$ определяется плотностью оборудования вдоль технологической цепочки и его техническими характеристиками [7], стремится свести при $t\to\infty$ начальное распределение предметов труда по состояниям к состоянию с равновесной функцией распределения для заданного технологического процесса. Производственная функция $f(t,S)$ определяется из заданного способа производства, представляет собой аналог силы, перемещающий предмет труда по технологическому маршруту. При таком перемещении на предмет труда оказывается воздействие со стороны орудий труда (технологического оборудования), в ходе которого происходит перенос технологических ресурсов на предмет труда. Мы можем говорить только о вероятности того, что при воздействии со стороны технологического оборудования предмет труда будет находиться в том или ином состоянии. Этот вероятностный характер воздействия технологического оборудования на предмет труда можно учесть, задав функцию $\psi(t,S,\mu)$, определяющую вероятность того, что после воздействия технологического оборудования предмет труда будет потреблять технологические ресурсы с интенсивностью μ. Функцию $\psi(t,S,\mu)$ можно задать, анализируя паспортные данные технологического оборудования и конструкторско-технические параметры технологии обработки предмета труда. Определим моменты $[\psi]_k$ функции $\psi(t,S,\mu)$ следующими выражениями:

$$\int_0^\infty \psi(t,S,\mu)d\mu=1, \quad \int_0^\infty \mu^k\cdot\psi(t,S,\mu)d\mu=[\psi]_k, \quad k=1,2.... \qquad (6)$$

Количество предметов труда, испытавших в единицу времени воздействие со стороны технологического оборудования в ячейке $d\mathrm{S}\cdot d\mu$ с координатами (S,μ) и переместившихся в результате воздействия в ячейку $d\mathrm{S}\cdot d\tilde{\mu}$ с координатами $(S,\tilde{\mu})$, пропорционально произведению потока предметов труда $\chi(t,S,\mu)\cdot\mu$ на вероятность перехода $\psi(t,S,\tilde{\mu})\cdot d\tilde{\mu}$. Что касается вероятности испытать непосредственно воздействие со стороны технологического оборудования, в ходе которого осуществляется переход предмета труда из ячейки $d\mathrm{S}\cdot d\mu$ в ячейку $d\mathrm{S}\cdot d\tilde{\mu}$, то можно утверждать, что эта вероятность пропорциональна плотности расположения оборудования $\lambda(S)$ вдоль технологической цепочки. Число предметов труда, испытавших в единицу времени воздействие со стороны технологического оборудования и принявшие значения в пределах $(\tilde{\mu};\tilde{\mu}+d\tilde{\mu})$ есть величина $\psi(t,S,\tilde{\mu})\cdot\lambda(S)\cdot\mu\cdot\chi(t,S,\mu)\cdot d\tilde{\mu}\cdot d\mathrm{S}\cdot d\mu$. Наряду с этим в элемент объема $d\mathrm{S}\cdot d\mu$ поступают предметы труда из объема $d\mathrm{S}\cdot d\tilde{\mu}$ путем обратного перехода в количестве $\psi(t,S,\mu)\cdot\lambda(S)\cdot\tilde{\mu}\cdot\chi(t,S,\tilde{\mu})\cdot d\tilde{\mu}\cdot d\mathrm{S}\cdot d\mu$, а общее число предметов труда в элементе объема $d\mathrm{S}\cdot d\mu$ изменяется в единицу времени на величину $d\mathrm{S}\cdot d\mu\cdot J(t,S,\mu)$:

$$J(t,S,\mu)=\lambda(S)\cdot\int_0^\infty\{\psi(t,S,\mu)\cdot\tilde{\mu}\cdot\chi(t,S,\tilde{\mu})-\psi(t,S,\tilde{\mu})\cdot\mu\cdot\chi(t,S,\mu)\}d\tilde{\mu}. \qquad (7)$$

С учетом (7) кинетическое уравнение (4) можно представить в виде:

$$\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial t}+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial S}\cdot\mu+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial\mu}\cdot f=\lambda\cdot\left\{\int_0^\infty\psi(\mu)\cdot\tilde{\mu}\cdot\chi(t,S,\tilde{\mu})d\tilde{\mu}-\mu\cdot\chi(t,S,\mu)\right\} \qquad (8)$$

В большинстве практических случаях функция $\psi(t,S,\mu)$ не зависит от состояния предметов труда до испытания воздействия со стороны технологического оборудования, откуда

$$\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial t}+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial S}\cdot\mu+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial\mu}\cdot f(t,S)=\lambda(S)\cdot\{\psi(t,S,\mu)\cdot[\chi]_1-\mu\cdot\chi(t,S,\mu)\}. \qquad (9)$$

Решение уравнений (8) и (9) предоставляет возможность вычислить значения макропараметров производственно-технических систем, которые являются моментами функции распределения $\chi(t,S,\mu)$, связано со значительными трудностями, и первый шаг анализа должен состоять в исследовании порядка величин различных слагаемых уравнения (4). Обозначим через τ, η, ξ характерные время, скорость изменения затрат и шаг по переменной S. Введем безразмерные переменные $\hat{t}$, $\hat{S}$, $\hat{\mu}$

$$t=\tau\cdot\hat{t}; \qquad S=\xi\cdot\hat{S};\ \ \mu=\eta\cdot\hat{\mu};\ \ J(t,S,\mu)=\langle\lambda_{оборуд}\rangle\cdot\eta\cdot\hat{J}(t,\hat{S},\hat{\mu}), \qquad (10)$$

где $\langle\lambda_{оборуд}\rangle$ - характерная плотность расположения оборудования вдоль технологической цепочки производственного процесса. Введем обозначения

$$K_v=\frac{1}{\langle\lambda_{оборуд}\rangle}\cdot\frac{1}{\xi}, \qquad P_m=\frac{\xi}{\tau\cdot\eta}, \qquad (11)$$

с учетом которых кинетическое уравнение производственно-технической системы (4) примет вид

$$K_v\cdot\left[P_m\cdot\frac{\partial\chi}{\partial\hat{t}}+\frac{\partial\chi}{\partial\hat{S}}\cdot\hat{\mu}+P_m\cdot\frac{\partial\chi}{\partial\hat{\mu}}\cdot\frac{d\hat{\mu}}{\partial\hat{t}}\right]=\hat{J}(t,\hat{S},\hat{\mu}). \qquad (12)$$

В предельных случаях вид кинетического уравнения производственно-технической системы (12) в нулевом приближении по малым параметрам $K_v\to 0$, $(1-K_v)\to 0$, $P_m\to 0$, $(1-P_m)\to 0$ и $1/P_m\to 0$ представлен в таблице №1. Умножив кинетическое уравнение (4) соответственно на μ^{n-1} $(n=1,2,..)$ и проинтегрировав по всему диапазону изменения величины μ, получим уравнения балансов для макропараметров технологического процесса производственно-технической системы (таблица №2), вид которых зависит от типа производства, определяющего внутренний состав технологического процесса.

В качестве значений характерных величин τ, ξ, η возьмем время производственного цикла T_d, среднюю себестоимость базового продукта S_d, и среднюю скорость изменения затрат η_d за период производственного цикла T_d. Величина $\frac{1}{\langle\lambda_{оборуд}\rangle}=L_d$ есть средняя величина перенесенных затрат на предмет труда между единицами оборудования. Тогда характерные числа, определяющие тип технологического процесса производственно-технической системы, примут вид:

$$K_v = \frac{L_d}{S_d}, \qquad P_m = \frac{S_d}{T_d \cdot \eta_d} \tag{13}$$

Таблица 1. Вид кинетического уравнения для технологического процесса в зависимости от типа производственно-технической системы

	$K_v \to 0, \quad \hat{J}(t,\hat{S},\hat{\mu}) = 0$	$K_v \to 1$
$P_m \to 0$	$\frac{\partial\chi}{\partial\hat{S}} \cdot \hat{\mu} = 0$	$\frac{\partial\chi}{\partial\hat{S}} \cdot \hat{\mu} = \hat{J}(t,\hat{S},\hat{\mu})$
$P_m \to 1$	$\frac{\partial\chi}{\partial\hat{t}} + \frac{\partial\chi}{\partial\hat{S}} \cdot \hat{\mu} + \frac{\partial\chi}{\partial\hat{\mu}} \cdot \frac{d\hat{\mu}}{\partial\hat{t}} = 0$	$\frac{\partial\chi}{\partial\hat{t}} + \frac{\partial\chi}{\partial\hat{S}} \cdot \hat{\mu} + \frac{\partial\chi}{\partial\hat{\mu}} \cdot \frac{d\hat{\mu}}{\partial\hat{t}} = \hat{J}(t,\hat{S},\hat{\mu})$
$P_m \to \infty$	$\frac{\partial\chi}{\partial\hat{t}} + \frac{\partial\chi}{\partial\hat{\mu}} \cdot \frac{d\hat{\mu}}{\partial\hat{t}} = 0$	$\frac{\partial\chi}{\partial\hat{t}} + \frac{\partial\chi}{\partial\hat{\mu}} \cdot \frac{d\hat{\mu}}{\partial\hat{t}} = \hat{J}(t,\hat{S},\hat{\mu})$

Таблица 2. Вид уравнений балансов для макропараметров технологического процесса в зависимости от типа производственно-технической системы, $n = 1,2,..$

	$K_v \to 0$	$K_v \to 1$
$P_m \to 0$	$\frac{\partial[\chi]_n}{\partial S} = 0$	$\frac{\partial[\chi]_n}{\partial S} = \int_0^\infty \mu^{n-1} \cdot J d\mu$
$P_m \to 1$	$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = 0,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}}{\partial S} = n \cdot f(t,S) \cdot [\chi]_{n-1}$	$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = \int_0^\infty d\mu \cdot J,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial S} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}}{\partial S} = n \cdot f(t,S) \cdot [\chi]_{n-1} + \int_0^\infty \mu^{n-1} \cdot J d\mu$
$P_m \to \infty$	$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} = 0,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial t} = n \cdot f(t,S) \cdot [\chi]_{n-1}$	$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = \int_0^\infty d\mu \cdot J,$ $\frac{\partial[\chi]_n}{\partial S} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}}{\partial S} = \int_0^\infty \mu^{n-1} \cdot J d\mu$

Значения характерных чисел (13), определяющие тип технологического процесса производственно-технической системы, дают возможность обосновать выбор модели описания технологического процесса. Такую оценку следует воспринимать скорее как качественную, чем количественную. Однако данный подход обладает тем преимуществом, что позволяет для каждого типа технологического процесса построить соответствующую ему адекватную модель описания.

Значение характерного числа K_v предусматривает два предельных случая: $K_v \to 0$ и $K_v \to 1$. Класс технологических процессов производственно-технических систем, для которых качественная оценка состояния дает значения коэффициентов $K_v << 1$ соответствует технологическому процессу с высокой концентрацией технологического оборудования и плотным потоком предметов труда вдоль технологической цепочки от одной технологической операции к другой. Случай $K_v \to 1$ соответствует технологическому процессу с малой плотностью обрабатывающего технологического оборудования вдоль технологической цепочки обработки продукта труда. Тем самым, предмет труда проходит большой путь между основными операциями, при этом предмет труда находится в межоперационных заделах, т.е. в состоянии ожидания технологической обработки. Значение характерного числа P_m определяет степень стационарности технологического процесса. Для производственно-технических систем с заметным увеличением или сокращением выпуска продукции значение характерного числа $P_m >> 1$. Производственно-технические системы со значением характерного числа $P_m \to 0$ соответствуют системам с синхронизированным темпом обработки предметов труда на технологических операциях.

Таким образом, технологический процесс производственно-технической системы может быть оценен и классифицирован в соответствии со значениями характерных чисел. Характерные числа дают качественную оценку состояния технологического процесса, позволяют подобрать для его описания соответствующую ему систему уравнений балансов макроскопических параметров производственно-технической системы (табл. 2). Технологические процессы различных производственно-технических систем, состояние которых характеризуется одинаковыми характерными числами K_v и P_m, описываются балансовыми уравнениями одного и того же вида. Такие технологические процессы являются подобными, имеют общие закономерности для поведения макропараметров технологического процесса.

Список литературы

1. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия. М.: Прогресс, 1961.- 341с.
2. Балашевич В.А. Математические методы в управлении производством. – Минск: Вышэйш. шк., 1976. – 334 с.
3. Лотов А.В. Введение в экономико-математическое моделирование. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.- 392 с.
4. Федоренко Н.П. Оптимизация экономики. – М.: Наука., 1977.- 245 с.
5. Шкурба В.В., Болдырева В.А., Вьюн А.Ф. Планирование дискретного производства в условиях АСУ. – К.: Техника, 1975. – 296 с.
6. Седов Л.И.Теория подобия и размерности в механике. – М.: Гос.изд. технико-теоретической литературы, 1954. – 328 с.
7. Демуцкий В.П., Пигнастая В.С., Пигнастый О.М. Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции // Доп. Нац. акад. наук України. - 2005. – N7. – С. 66 - 71
8. Pihnastyi O.M. Distinctive numbers of production systems functioning description / O.M.Pihnastyi // Problems of Atomic science and technology. - Kharkov: KIPT. - 2007. - №3 - P. 322-325. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/111018
9. Локтев И.И., Власов В.А., Тихомиров И.А. Вопросы моделирования технологического процесса. – Известия томского политехнического университета, 2005. – т.308, №6- С.90-94
10. Пигнастый О. М. Использование методов статистической физики для исследования экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, О. М. Пигнастый, М. Н. Азаренкова // Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. -2005. - № 710. Сер. ”Фізична”, вип. 2. - С. 128-134
11. Заруба В.Я. О взаимосвязи микро- и макроописания производственно-технических систем / В.Я.Заруба , О. М. Пигнастый, // Управление большими системами: труды Международной научно-практической конференции (Москва 17-19 ноября 2009). – Москва: ИПУ РАН, 2009. - С. 255-258.