

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

А.Ф. Резчиков, В.А. Твердохлебов

Для описания взаимосвязей и взаимодействий однородных процессов, образующих производственные процессы, предложены дискретные детерминированные модели в форме причинно-следственных комплексов. Разработаны основные положения построения комплексов, новые структуры звеньев и правила композиции звеньев и комплексов. Предложен формализованный язык для представления структуры и комплекса в целом. Отмечено, что разработанные средства позволяют представлять комплексы иерархической структурой с последовательным переходом от грубого и приближенного описания производственного процесса к его представлению моделью с заданными глубиной, полнотой и точностью.

Ключевые слова: причина, следствие, условие реализации причинно-следственной связи, группа причины, группа следствия, комплекс причинно-следственных связей, дискретный процесс, взаимодействие процессов.

ВВЕДЕНИЕ

В основе производственных процессов лежат взаимодействия процессов различной природы: технологических, кадровых, процессов энергообеспечения, процессов обеспечения оборудованием технологических процессов, процессов обеспечения сырьем и комплектующими и т. п. Для построения моделей производственных процессов должны быть определены взаимосвязи и взаимодействия разнородных процессов, что требует формы моделей, допускающей представление процессов в общем виде (см., например, работы [1–10]). Разработанные модели построены на основе общих категорий причины и следствия, их развития с учетом условия реализации причинно-следственной связи и условия, получающегося после реализации связи. В работах [11, 12] изложены исходные положения построения причинно-следственных комплексов, в которых использованы новая структура как элементарных звеньев причинно-следственных связей, так и композиций элементарных звеньев. Новая предлагаемая структура модели изображена на рис. 1.

В настоящей работе рассматриваются процессы в сложном производстве, среди которых определяющими выступают технологические процессы с их представлением, ограниченном взаимосвязями и взаимодействиями следующих пяти компонентов:

- U_1 — команда (график, инструкция, стимул или желание, распоряжение и т. п.);
- U_2 — исполнитель (специалист, робот, устройство управления и т. п.);
- U_3 — оборудование;
- U_4 — энергоресурсы;
- U_5 — комплектующие, сырье и т. п.

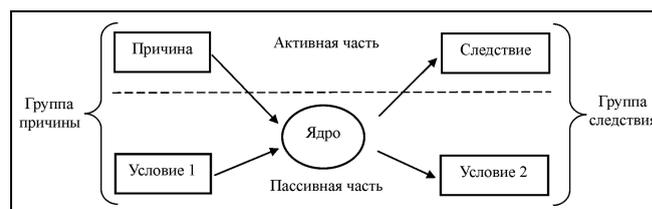


Рис. 1. Структура элементарного звена и комплекса причинно-следственных связей с разделением на группу причины и группу следствия

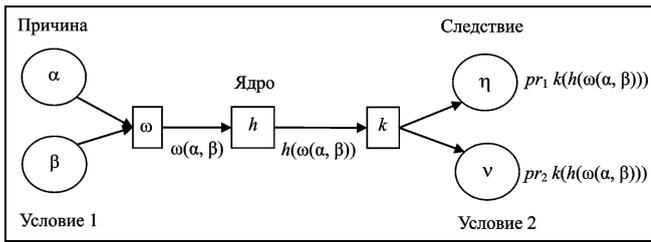


Рис. 2. Расширенная структура элементарного звена причинно-следственных связей, включающая в себя операции совмещения и расширения компонентов

Для каждого из пяти компонентов выделяется частный универсум: Ω_1 — универсум команд, Ω_2 — универсум исполнителей, Ω_3 — универсум оборудования, Ω_4 — универсум вариантов энергообеспечения и Ω_5 — универсум сырья, комплектующих и т. п. Пусть $\Omega \subset \Omega_1 \times \Omega_2 \times \Omega_3 \times \Omega_4 \times \Omega_5$ — множество компонентов, имеющих интерпретацию в области приложений.

Для производственных процессов соответствующая модель может быть только моделью кибернетического характера, т. е. содержащая математическую модель как фрагмент, содержащая представление средствами формализованного языка структуры взаимосвязей и взаимодействий компонентов процессов и банки данных, определяющие операции над используемыми однородными и разнородными компонентами. Определение операций с указанием связей аргументов и результатов операции в форме таблиц существенно. Математические средства эффективно определяют связи на основе количественно выраженных отношений, что представляет большие трудности при совмещении числовых и нечисловых аргументов.

В разработке моделей сложных производственных процессов участвуют специалисты, рассматривающие производственные процессы на различных уровнях детализации и общности в диапазоне от принципиальных характеристик производства до инженерного конструктивизма конкретных технологических операций. В связи с этим модель должна быть иерархической, что отражается в специфике структуры причинно-следственных комплексов: звенья и комплексы причинно-следственных связей имеют аналогичное строение (см. рис. 1 и далее рис. 2).

Разработанная модель ориентирована на производственные процессы, однако в силу ее формальной общности она вполне применима для моделирования сложных социально-экономических, биологических и других систем. Необходимо лишь рассматриваемые в данной работе пять типов компонентов заменить другими, соответствующими рассматриваемой области приложений.

В данной статье даны ссылки только на некоторые, существенно повлиявшие на представления авторов, работы [1–3, 5, 6, 8, 10, 13–16]. Более полный библиографический список приведен в работе [12].

1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Достаточно развитые формальные и специализированные аппараты для представления взаимосвязей и взаимодействий между однородными (командно-информационными, кадровыми, энергообеспечивающими и др.) процессами, объектами и событиями, представленными в компонентах U_1, U_2, \dots, U_5 , по мнению авторов, требуют дальнейшего развития. Фундаментальные исследования построения моделей сложных систем отражены, например, в работах [1, 2, 8–10, 15]. В монографии [2] рассматриваются «физическое моделирование и математическое моделирование» (с. 42), в которых учитываются «различное физическое содержание» оригиналов, описываемое «одинаковыми математическими соотношениями». В работе [8] отмечается, что «управление большинством технологических процессов пока неосуществимо или мало эффективно без участия человека» (с. 15). Однако в списке основных понятий, с использованием которых строятся модели производственных процессов, участие исполнителя (человека) отсутствует или включается в технологические операции неявно. Управление производством «следует рассматривать как сложный исполнительный механизм многоуровневой системы» [4, с. 5]. В достаточно полном и подробном изложении связи САПР с автоматизацией производства, содержащемся в работе [4], например, информационным процессам в управлении производством уделено лишь полторы страницы (с. 495). В этой и многих других работах, посвященных построению моделей сложных производственных процессов, составляющие их однородные процессы предполагаются изолированными между собой с помощью фиксации взаимосвязей рассматриваемого процесса с другими процессами. Это означает, что в существующих подходах к построению математических моделей сложных производственных процессов такие процессы исследуются не как взаимодействующие однородные процессы (однородные командно-информационные процессы; процессы подготовки, размещения и использования исполнителей; процессы использования оборудования; процессы энергообеспечения; процессы обеспечения сырьем и комплектующими и др.), а как отдельные однородные процессы при фиксированных характеристиках остальных процессов. В ряде работ (см., например, [5]) рассматривается совме-

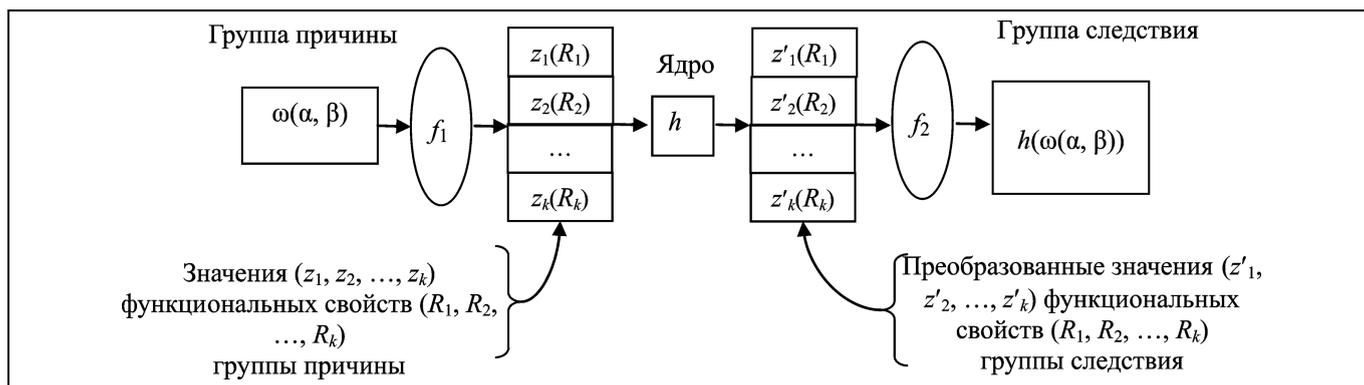


Рис. 3. Схема связи свойств пяти базовых процессов с функциональными свойствами объекта, для которого строятся звенья и комплексы причинно-следственных связей

ние некоторых однородных и конкретных технологических процессов.

В данной статье сложный производственный процесс представляется как результат взаимосвязей и взаимодействий однородных процессов, входящих в модель в явном виде, образуя модель единого и общего производственного процесса, что позволяет более глубоко и полно ставить и решать задачи управления, технического диагностирования, анализа и синтеза, оптимизации и другие в сложных системах.

Совмещение разнородных процессов в причинно-следственных категориях приводит к повышению значения таких процедур, в частности, к повышению роли вводимых операций совмещения ω и расщепления θ . Например, командно-информационный компонент элемента универсума существенно влияет на все пять компонентов результата совмещения. Такое влияние невозможно формализовать только количественными отношениями. Средством формализации операций ω и θ оказывается задание операций не только числовыми структурами, но и таблично в символьной форме (табл. 1, 2).

Элементарные звенья причинно-следственных связей рассматриваются как базовые элементы, из которых синтезируются комплексы причинно-следственных связей. Структура элементарного звена причинно-следственных связей, включающая в себя пять компонентов (причину, условие 1, следствие, условие 2, ядро) расширяется включением

в нее операций совмещения ω и расщепления k (см. рис. 2).

К причине относятся те компоненты производственного процесса, которые дополняют имеющиеся и представленные в условии 1 факторы, достаточные для получения группы следствия. На рис. 3 показано, что ядро h можно рассматривать как преобразование не набора $\omega(\alpha, \beta)$ значений пяти компонентов $U_1—U_5$, а как преобразование набора значений (z_1, z_2, \dots, z_k) функциональных свойств (R_1, R_2, \dots, R_k) группы причины в набор значений $(z'_1, z'_2, \dots, z'_k)$ этих свойств, полученный для группы следствия. В функциональных свойствах (R_1, R_2, \dots, R_k) , связанных с целевым предназначением рассматриваемого объекта, обобщены и представлены свойства однородных процессов. Функции f_1 и f_2 определяют связи свойств пяти базовых процессов с функциональными свойствами объекта. В причинно-следственных комплексах в узлах соединения элементов, а также при их совмещении в группу причины и при расщеплении группы следствия для применения последующих операций композиции формируются банки, задающие операции вида $\omega : \Omega \times \Omega \rightarrow \Omega$, $k : \Omega \rightarrow \Omega \times \Omega$. Ядро, математически описывающее преобразование группы причины в группу следствия, является отображением вида $h : \Omega \rightarrow \Omega$ (табл. 1). Понятие «сложная система» характеризуется большим числом элементов системы или сложностью их взаимодействий.

Таблица 1

Интерпретация массивов в банках данных в причинно-следственных категориях

Банк ядер $h : \Omega \rightarrow \Omega$		Банк операций $\omega : \Omega \times \Omega \rightarrow \Omega$			Банк операций $k : \Omega \rightarrow \Omega \times \Omega$		
Группа причины	Группа следствия	Причина	Условие 1	Группа причины	Группа следствия	Следствие	Условие 2

2. АЛГЕБРА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Операции над звеньями и комплексами определяются так, чтобы вариант $a \in \Omega$ & $\bar{a} \in \Omega$ (аналог противоречия) не использовался в операции и в результате, полученном применением операции. Обозначим через $P^*(\Omega)$ множество всех тех элементов множества $P(\Omega)$, которые ни для какого $a \in \Omega$ не содержат одновременно a и \bar{a} .

Определение 1. Элементарным звеном причинно-следственной связи будем называть совокупность семи объектов $a = ((a, b), (c, d), \rho, \omega, k)$, где a, b, c и d — элементы множества $P^*(\Omega)$, ρ — бинарное отношение вида $\rho \subset (P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \times P^*(\Omega))$, ω — операция совмещения вида $\omega: P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$, а k — операция расщепления вида $k: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega) \times P^*(\Omega)$. ♦

Пара (a, b) называется группой причины (a — причина, b — условие 1), а пара (c, d) — группой следствия (c — следствие, d — условие 2).

Правила, определяющие бинарное отношение ρ , представлены ядром звена с учетом операций совмещения и расщепления. Операция совмещения ω позволяет рассматривать ядро как отображение h вида $h: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$, что оказывается существенным при формальном определении ядра и его интерпретации. Задание операций таблицами частично содержит расчетные формулы, если они имеются.

Алгебра причинно-следственных комплексов имеет вид $a = (\Omega, \{\omega_i\}_{i \in I}, \{K_j\}_{j \in J}, \{h_m\}_{m \in M})$, Ω — алгебраическое множество, $(\{\omega_i\}_{i \in I}, \{K_j\}_{j \in J}, \{h_m\}_{m \in M})$ — система алгебраических операций, где $\omega_i: P^*(\Omega) \times P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$, $K_j: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega) \times P^*(\Omega)$, $h_m: P^*(\Omega) \rightarrow P^*(\Omega)$. Введение операций совмеще-

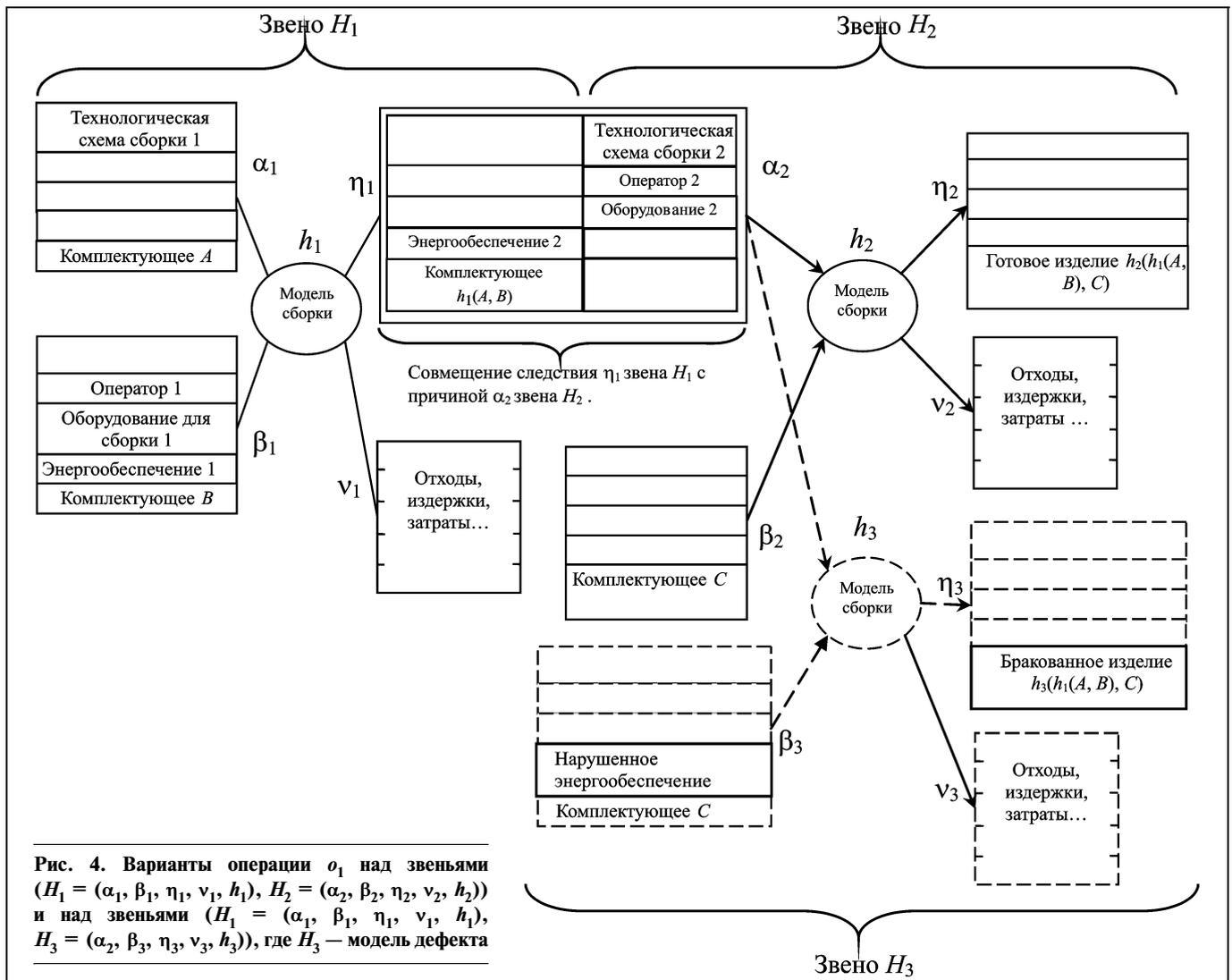


Рис. 4. Варианты операции o_1 над звеньями ($H_1 = (\alpha_1, \beta_1, \eta_1, \nu_1, h_1)$, $H_2 = (\alpha_2, \beta_2, \eta_2, \nu_2, h_2)$) и над звеньями ($H_1 = (\alpha_1, \beta_1, \eta_1, \nu_1, h_1)$, $H_3 = (\alpha_2, \beta_3, \eta_3, \nu_3, h_3)$), где H_3 — модель дефекта



ния ω и расщепления k не использовалось в работах [1—9, 15] и других, так как в разрабатываемых ранее моделях производственных процессов рассматривались только однородные процессы (например, только командно-информационные процессы, только процессы энергообеспечения и т. д.), а остальные процессы предполагались зафиксированными.

Например, при анализе функционирования авиационно-транспортной системы (АТС) [7] рассматриваются функциональные отказы (ФО). Они определяются как состояния АТС, в которых нарушены ее функциональные свойства, порождающие неработоспособные состояния системы в целом, независимо от причин, вызвавших это состояние. В связи с этим при определении причинно-следственных связей разнородных процессов, образующих функционирование АТС и возникновение ФО, требуется исследовать связь ФО с действиями по их парированию (ликвидации). Однако эффективность действий по парированию функциональных отказов в связи с тем, что ФО может иметь несколько вариантов причин, его порождающих, зависит от учета специфики причин. Переход от параметров, характеристик, свойств и других факторов, представляющих отдельные процессы и их взаимодействия в ФО, к обобщенным свойствам АТС в форме ФО требует использования причинно-следственных связей.

Таким образом, ядра в элементарных звеньях причинно-следственных связей и в комплексах причинно-следственных связей могут определяться как связи между базовыми процессами и как связи между функциональными свойствами рассматриваемого объекта.

На рис. 4 приведен пример использования операции o_1 , определяемой тождеством $\eta_1 \equiv \alpha_2$. Часть $o_1(H_1, H_2)$ комплекса представляет сборку изделия $h_2(h_1(A, B), C)$ из комплектующих A, B и C , а компонент $o_1(H_1, H_3)$ — сборку бракованного изделия при нарушении энергообеспечения. Использование аппарата причинно-следственных комплексов позволяет для любых уровней полноты и точности представления анализировать функционирование сложных систем в нормальном и нарушенном [7] режимах функционирования систем.

3. ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ЯЗЫК АЛГЕБРЫ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Результаты операции могут быть представлены формулами языка причинно-следственных комплексов. Такие формулы конструируются по правилам композиции структурных автоматов. Причинно-следственные комплексы предназначены для

систематизации и формализации сложных взаимосвязей и взаимодействий, поэтому их структура должна быть иерархической. Для повышения эффективности различных процедур (анализа, синтеза, оптимизации, распознавания и др.) структуре причинно-следственных комплексов придается свойство фрактальности, т. е. подобия целого любым его компонентам, включая элементарные звенья. Это позволяет на любом уровне иерархии сохранять явный вид причин, следствий, условий и ядер.

Предназначение ядра в элементарном звене, в части комплекса и комплексе причинно-следственных связей состоит в описании связей группы причины с группой следствия. Иерархическое построение комплекса предполагает, что ядра уточняются в направлении от предыдущего уровня иерархии к следующему путем замены в ядрах общих описаний точными операциями над компонентами. Ядра включают в себя математические формулы, определяющие числовые зависимости показателей компонентов, а также связи символьных показателей, точно определенные таблицами их соответствий.

Благодаря фрактальности каждое элементарное звено и каждый комплекс причинно-следственных связей имеют такую же форму зависимости. Это позволяет строить формулы, определяющие результат применения операции o_i , на основе только математической операции суперпозиции. Введем следующие обозначения для элементарных звеньев причинно-следственных связей: $H_1 = (\alpha_1, \beta_1, \eta_1, \nu_1, h_1)$ и $H_2 = (\alpha_2, \beta_2, \eta_2, \nu_2, h_2)$. При построении формул, определяющих звенья и комплексы причинно-следственных связей, будут использоваться обозначения, показанные на рис. 5.

Операции над звеньями и частями комплекса систематизируем аналогично операциям композиции при построении структурных автоматов в соответствии с правилами правильной композиции автоматов [5]. Результат каждой из 24-х операций задается тождеством и определяется четырьмя формулами: формулой, определяющей причину;

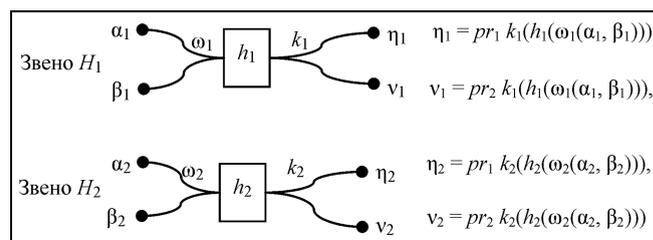


Рис. 5. Формулы функциональной зависимости следствия и условия 2 от причины и условия 1

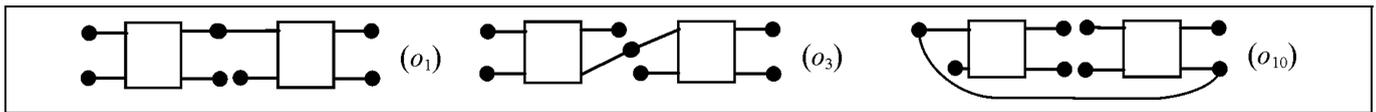


Рис. 6. Примеры схем операций последовательного соединения

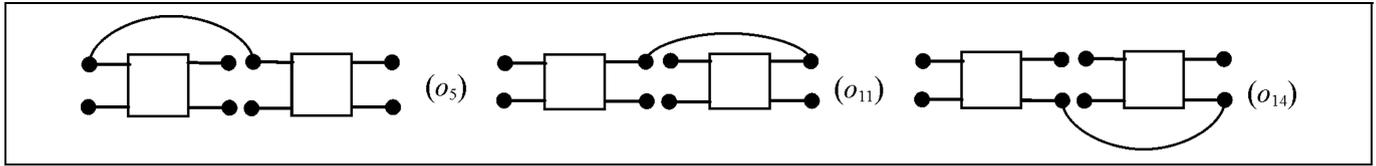


Рис. 7. Примеры схем операций параллельного соединения

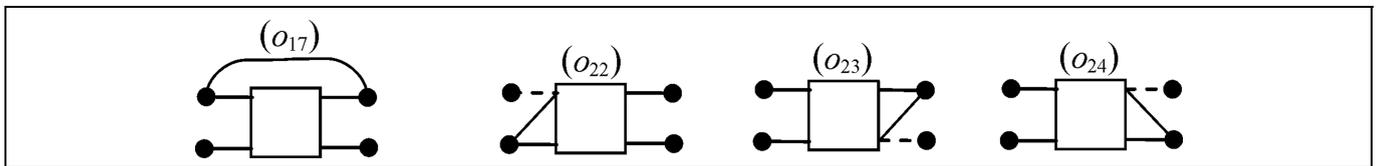


Рис. 8. Примеры схем унарных операций над звеньями и комплексами причинно-следственных связей

формулой, определяющей следствие и формулами, определяющими условия 1 и 2. На рис. 6—8 в обозначениях из работы [9] показана структура результатов композиции звеньев и комплексов причинно-следственных связей для операций последовательного соединения (см. рис. 6), операций параллельного соединения (см. рис. 7) и унарных операций (см. рис. 8). Аргументы операций композиции по построению имеют стандартные структуру и интерпретацию (см. рис. 1, 2, 5), что приводит к 24 вариантам операций композиции. Формализация взаимосвязей и взаимодействий группы причины и группы следствия основывается на достаточно строгом (в зависимости от возможностей) описании. Такое описание может включать в себя математические формулы, принятые на основании гипотез, отношений, опытных данных, результатов деятельности экспертов и др., что оказывается естественным в связи со сложностью задачи описания. Например, формулы, представляющие операции композиции o_1 и o_{15} , имеют вид:

- операция o_1 определяется тождеством $\eta_1 \equiv \alpha_2$;
в звене $o_1(H_1, H_2)$: a_1 — причина; $\omega_3(b_1, b_2)$ — условие 1; $pr_1(k_2(h_2(pr_1(k_1(h_1(\omega_1(a_1, b_1)))))))$ — следствие; $\omega_4(v_1, v_2)$ — условие 2;
- операция o_{15} определяется тождеством $\beta_1 \equiv v_2$;
в звене $o_{15}(H_1, H_2)$: $\omega_3(a_1, a_2)$ — причина; β_2 — условие 1;

$\omega_4(pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), pr_1k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))))$ — следствие; $pr_2k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1)))$ — условие 2.

Очевидная простота структур операций композиции не означает, что операции простые. Например, в области приложений отождествлению узлов элементов должны быть даны не только интерпретация, но и точное определение. При совмещении операцией типа ω двух элементов универсума $\alpha, \beta \in \Omega$ (см. рис. 3) компоненты этих элементов α_2 (три специалиста) и β_2 (два специалиста) порождают компонент c_{22} элемента $\omega(\alpha, \beta)$, который на содержательном уровне может оказаться полной бригадой, просто набором из пяти специалистов или группой конфликтующих лиц. Это показывает сложность операций отождествления узлов.

Например, формулы, представляющие операции композиции o_6 и o_{11} , имеют вид:

- операция o_6 определяется тождеством $\alpha_1 \equiv \beta_2$;
в звене $o_6(H_1, H_2)$: α_2 — причина; β_1 — условие 1;
 $\omega_3(pr_1k_1(h_1(\omega_1(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_1))), pr_1k_2(h_2(\omega_2(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_2))))$ — следствие;
 $\omega_5(pr_2k_1(h_1(\omega_1(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_1))), pr_2k_2(h_2(\omega_2(\omega_4(\alpha_1, \beta_2), \beta_2))))$ — условие 2;
- операция o_{11} определяется тождеством $\eta_1 \equiv \eta_2$;
в звене $o_{11}(H_1, H_2)$: $\omega_3(\alpha_1, \alpha_2)$ — причина; $\omega_4(\beta_1, \beta_2)$ — условие 1;



$\omega_5(pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), pr_1k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))))$ — следствие;
 $\omega_6(pr_2k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), pr_2k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))))$ — условие 2.

Еще большие сложности возникают при формализации унарных операций. Даже в случае композиции автоматов, представляющих собой однородные технические системы, образование обратных связей может приводить к логическим противоречиям, требует явного учета моментов времени и согласования разнородных процессов, объектов, событий, содержащихся в отождествляемых «узлах». Например, операции o_{17} и o_{24} изменяют два компонента звеньев, из которых один компонент полагается пустым и обозначается \emptyset . Этим операциям соответствуют следующие варианты отождествлений: $\alpha_1 \equiv \eta_1$, определяет цикл, где $\omega_3(\alpha_1, \eta_1) = \omega_3(\alpha_1, pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))))$, и \emptyset — причина, \emptyset — следствие, β_1 — условие 1, v_1 — условие 2 (для операции o_{17}); $\eta_1 \equiv v_1$, где \emptyset — следствие, $\omega_3(\eta_1, v_1)$ — условие 2 (для операции o_{24}).

Полный список формул, определяющих все 24 операции композиции, содержится, например, в работе [12].

4. ПРИМЕР ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ В БАНКАХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЪЕДИНЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ

Сложная операция, задаваемая тождествами $\alpha_1 \equiv \alpha_2, \beta_1 \equiv \beta_2, \eta_1 \equiv \eta_2, v_1 \equiv v_2$, определяется формулами:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= pr_1k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), & v_1 &= pr_2k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))), \\ \eta_2 &= pr_1k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))), & v_2 &= pr_2k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))), \\ \alpha_1 &= pr_1k_3(\alpha_3), & \alpha_2 &= pr_2k_3(\alpha_3), & \beta_1 &= pr_1k_4(\beta_3), \\ \beta_2 &= pr_2k_4(\beta_3), & \eta_3 &= \omega_3(\eta_1, \eta_2), & v_3 &= \omega_3(v_1, v_2). \end{aligned}$$

Структуру операции см. на рис. 9.

Операции вида ω_j, k_j и h_m определены в банках данных явно или с помощью математических формул, условий, ограничений и т. п. (табл. 2). Про-

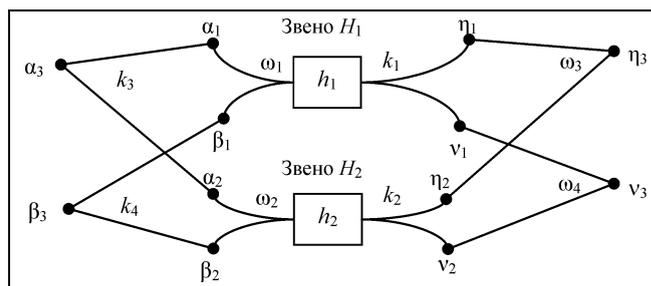


Рис. 9. Структура операции, задаваемой тождествами $\alpha_1 \equiv \alpha_2, \beta_1 \equiv \beta_2, \eta_1 \equiv \eta_2, v_1 \equiv v_2$

изводственный процесс представляется в комплексе причинно-следственных связей как последовательность таких наборов факторов, каждый из которых имеет активную (доступную и предполагаемую к формированию) часть α и пассивную (предполагаемую имеющейся) часть β . Совмещение частей α и β в группу причины порождает новое качество, которым не обладают эти части в отдельности. Например, совмещение станка, оператора и энергообеспечения порождает новое качество — возможность изготавливать продукцию. Совмещение этих факторов с технологической схемой изготовления и необходимых сырья и комплектующих определяет новое качество — ориентированное производство изделий. В связи с этим в банках данных, указанных в табл. 2, для символического представления исходных факторов (аргументов символических операций h, ω, K) таблично определяются результаты выполнения этих операций.

5. МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Алгебра и язык причинно-следственных комплексов с соответствующим построением банков данных, определяющих операции совмещения ω , расщепления k и преобразования h элементов универсума Ω , составляют методическую и конс-

Таблица 2

Структура элементов массивов при табличном задании ядра и операций совмещения и расщепления

Банк ядер $h : \Omega \rightarrow \Omega$		Банк операций $\omega : \Omega \times \Omega \rightarrow \Omega$			Банк операций $k : \Omega \rightarrow \Omega \times \Omega$		
...
$\omega_1(\alpha_1, \beta_1)$	$h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1))$	α_1	β_1	$\omega_1(\alpha_1, \beta_1)$	$k_3(\alpha_3)$	α_1	α_2
$\omega_2(\alpha_2, \beta_2)$	$h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))$	α_2	β_2	$\omega_2(\alpha_2, \beta_2)$	$k_4(\beta_3)$	β_1	β_2
...	...	η_1	η_2	$\omega_3(\eta_1, \eta_2)$	$k_1(h_1(\omega_1(\alpha_1, \beta_1)))$	η_1	v_1
		v_1	v_2	$\omega_4(v_1, v_2)$	$k_2(h_2(\omega_2(\alpha_2, \beta_2))) \dots$	η_2	v_2
	

структивную основу построения кибернетических моделей взаимосвязей и взаимодействий объектов, процессов и явлений в сложных системах. Возможны различные варианты применения этих средств для разработки моделей. Рассмотрим метод построения моделей, ориентированных на решение следующей задачи.

Заданы: множество $Z \subset \bigcup_{i=1}^5 \Omega_i$; подмножество $\Theta \subset \Omega$; банки данных, определяющие операции совмещения ω , расщепления k и преобразования элементов множества Ω .

Требуется построить комплекс причинно-следственных связей вида $K = (\alpha, \beta, \eta, \nu, (pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta))))), (pr_2 k(h(\omega(\alpha, \beta))))$, для которого выполняются условия $\alpha \in \Theta, \beta \in \Theta$ и все элементы множества Z входят в элемент $(pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta))))$ универсума Ω .

Замечание. В комплексе причинно-следственных связей K элемент $\omega(\alpha, \beta)$ универсума Ω интерпретируется как группа причины с активно формируемой частью (причиной) α и имеющейся пассивной частью (условием 1) β . В группе следствия $h(\omega(\alpha, \beta))$ выделяется следствие $pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta)))$, в котором содержатся требующиеся для получения элементы множества Z . Оставшиеся после реализации причинно-следственных взаимодействий, описанных комплексом K , компоненты определяются комплексом как условие 2 $pr_1 k(h(\omega(\alpha, \beta)))$. Если причинно-следственный комплекс определяется для уже имеющегося производственного процесса, то его можно построить путем «покрытия» производственного процесса элементарными причинно-следственными звеньями. В этом случае элементарные причинно-следственные звенья являются моделями частей производственного процесса. ♦

Метод покрытия множества компонентов элементарными звеньями причинно-следственных связей состоит в следующем.

Этап 1. На основе банков данных, определяющих операции совмещения ω , расщепления k и преобразования h строится банк элементарных звеньев причинно-следственных связей, в котором каждое звено имеет вид: $H_i = (\alpha_i, \beta_i, \eta_i, \nu_i, (pr_1 k_i(h_i(\omega_i(\alpha_i, \beta_i))))), (pr_2 k_i(h_i(\omega_i(\alpha_i, \beta_i))))$.

Этап 2. В множестве Ω выделяется подмножество $\Omega(0) \subset \Omega$ таких элементов универсума, которые содержат все требующиеся компоненты, представленные как элементы множества Z .

Этап 3. Построение комплекса K систематизируется как построение последовательности комплексов

$$K(0), K(1), \dots, K(t_0) \quad (1)$$

и последовательности подмножеств компонентов

$$\Omega(0), \Omega(1), \dots, \Omega(t_0). \quad (2)$$

Комплекс $K(0)$ определяется как покрытие множества $\Omega(0)$ группами следствий элементарных звеньев из банка звеньев, сформированного на этапе 1.

Комплекс $K(t)$, где $t > 0$, определяется как покрытие группы причины комплекса $K(t-1)$ группами следствий, выбранных из банка звеньев элементарных звеньев причинно-следственных связей. Построение последовательностей (1) и (2) прекращается при условии, что комплекс $K(t_0)$ в группе причины содержит только элементы из множества Θ или построение такого комплекса невозможно (в последнем случае должны быть изменены условия задачи или дополнены банки данных, определяющих операции вида ω, k и h на основе расширения универсумов $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$).

В данном методе представлены основные положения построения комплексов причинно-следственных связей для совмещения разнородных процессов. Очевидным образом метод модифицируется изменениями направления покрытия элементарными звеньями:

- одновременное встречное «движение» двух направлений покрытия: покрытия множества Z следствиями звеньев и покрытия звеньями, группы причины которых включаются в множество Θ ;
- одновременное построение (или использование уже имеющихся) фрагментов комплекса K и их соединение в комплекс;
- формирование банка звеньев причинно-следственных связей как некоторого полного базиса и использование этого базиса аналогично проектированию технических систем из элементов функционально полного базиса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Разработаны основные положения и формальный аппарат (алгебра синтеза причинно-следственных комплексов и язык формул) для описания структуры производственных процессов. Предложена новая структура элементарных звеньев причинно-следственных связей, состоящая из причины, следствия, условия 1 реализации причинно-следственной связи, условия 2 реализации связи и ядра. Разработаны операции композиции, сохраняющие фрактальность, что позволяет на любом уровне иерархии причинно-следственного комплекса в явном виде получить разделение составляющих комплекса по категориям: причина, следствие, условие 1, условие 2. Выбранный набор однородных процессов (командно-информацион-



ные, подготовки и использования исполнителей, подготовки и использования оборудования, энергообеспечения, обеспечения комплектующими и сырьем), совмещается в единый производственный процесс, ориентированный на машиностроение. Специфическими и новыми являются операции совмещения и расщепления компонентов, без которых не достигается глубина и полнота описания производственного процесса. В связи группы причины и группы следствия выделена основная ее составляющая — ядро, которое в зависимости от уровня иерархии разрабатываемого комплекса причинно-следственных связей может быть представлено в различных вариантах математической строгости, полноты, связей числовых и содержательных показателей. Ядро — это совокупность правил, определяющих преобразование группы причины в группу следствия, и формально состоит из аналитических структур (числовых формул), алгоритмических компонентов, табличных заданий, полученных с помощью экспертов, и связей нечисловых показателей. Выполненные исследования показали применимость предложенных моделей для решения различных задач (управления, технического диагностирования, выявления причин аварий и др.) в сложных технических системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аскин Я.Ф. Философский детерминизм и научное познание. — М.: Мысль, 1977.
2. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика. — М.: Наука, 1990. — 360 с.
3. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. — М.: Сов. радио, 1973. — 384 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
5. Интеллектуальное управление динамическими системами / С.Н. Васильев, А.К. Жерлов, Е.А. Федосов, Б.Е. Федун. — М.: Физматлит, 2002.
6. Глушков В.М. Синтез цифровых аппаратов. — М.: Физматгиз, 1962. — 435 с.
7. Гуввер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства. — М.: Мир, 1987. — 528 с.
8. Логистические цепи сложно-технологических производств / Л.Б. Миротин, В.А. Корчагин, С.А. Ляпин, А.Г. Некрасов. — М., 2005. — 286 с.
9. Налетов И.З. Причинность и теория познания. — М.: Мысль, 1975.
10. Новиков Д.А., Смирнов И.М., Шохина Т.Е. Механизмы управления динамическими активными системами. — М.: ИПУ РАН, 2002. — 124 с.
11. Новожилов Г.В., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г. Безопасность полета самолета: концепция и технология. — М.: Изд-во МАИ, 2007. — 196 с.
12. Первозванский А.А. Математические модели в управлении производством. — М.: Наука, 1975. — 616 с.
13. Проектирование технологий. — М.: Машиностроение, 1990. — 415 с.
14. Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Причинно-следственные комплексы как модели процессов в сложных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2007. — № 7. — С. 2—8.
15. Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Причинно-следственные модели производственных систем. — Саратов: Научная книга, 2008. — 183 с. — ISBN 5-93888-920-0.
16. Цвирукун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. — М.: Наука, 1982. — 200 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Резчиков Александр Фёдорович — чл.-корр. РАН, директор, ☎ (8452) 22-23-76, ✉ iptmuran@san.ru,

Твердохлебов Владимир Александрович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎ (8452) 22-23-40, ✉ tverdokhlebovva@list.ru,

Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов.



С 26 по 28 октября 2010 г. в Москве состоится V Международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления» (RASO'2010). Конференция проводится Институтом проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН при поддержке Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Российского национального комитета по автоматическому управлению и Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации.

Тематика конференции

- Математические модели, вычислительные методы, программы и архитектуры распараллеливания вычислений
- Технологии программирования параллельных и распределенных систем
- Параллельные и распределенные вычисления в задачах моделирования, анализа, идентификации, управления и оптимизации
- Проблемы совместного проектирования и синтеза параллельных программ и архитектур
- Проблемы интеграции данных, программ, процессов и систем в глобальной компьютерной среде
- Архитектуры распределенных вычислительных и управляющих систем в компьютерных сетях
- Надежные вычисления и защита информации в распределенных компьютерных средах
- Компьютерные системы с самообучением и самоорганизацией
- Презентации проектов вычислительных и управляющих систем с параллельной и/или распределенной обработкой информации

Более подробную информацию можно найти на сайте <http://raso.ipu.ru>.