

СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЗЕРВ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

М. Ю. Копнин⁽¹⁾, В. В. Кульба⁽¹⁾, Е. А. Микрин⁽²⁾

⁽¹⁾ Институт проблем управления им В. А. Трапезникова, г. Москва;

⁽²⁾ Ракетно-космическая корпорация "Энергия", г. Королёв

Введено понятие одного из специальных видов резервов, характерных для производственных систем, — структурно-технологического резерва. Для описания работы таких систем применен язык модифицированных сетей Петри. На основании свойств потока маркеров введены понятия стоимости, гибкости и устойчивости производственного процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастание масштабов техногенной деятельности современного общества крайне обострили проблемы, связанные с обеспечением безопасности человека, общества и окружающей среды. В этой связи крайне актуальной становится задача повышения устойчивости производственных систем к возникающим на них авариям [1]. В данной статье приводится описание технологии работы производственной системы на языке модифицированных сетей Петри [2—4], представляющее собой последовательность срабатывания переходов, задающую некоторый поток маркеров.

В ходе производственного процесса на отдельных звеньях могут возникать различного рода аварии, несчастные ситуации, приводящие к возникновению поражающих факторов, и прочие нежелательные события, которые могут быть классифицированы как чрезвычайная ситуация (ЧС). В результате функционирования части производственных звеньев может быть остановлено [5, 6]. Для возобновления производственного процесса в целом, возможно, с меньшей эффективностью, необходимо наличие резерва. В данной статье определяется один из специальных видов резервов — структурно-технологический резерв, вводятся понятия стоимости, гибкости и устойчивости производственного процесса.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Вначале дадим нестрогие определения рассматриваемых понятий, в дальнейшем те же определения будут сформулированы на языке сетей Петри.

Технологической операцией, выполняемой на производственном звене, назовем преобразование сырья в го-

товую продукцию. Результат одной технологической операции может служить входом для другой. Таким образом, *технологический процесс* может быть задан как набор взаимосвязанных по входам и выходам технологических операций.

У каждой технологической операции может быть несколько *технологических схем* — способов преобразования сырья в готовую продукцию. Кроме того, для каждой технологической схемы может быть задан вектор характеристик, таких как время выполнения технологической операции, стоимость операции и др.

Структурно-технологическим резервом технологической схемы операции назовем множество технологических операций и их технологических схем (оборудования и технологии его применения), которые могут заменить данную технологическую схему операции при выходе ее строя, не нарушая работу системы (технологического процесса) в целом.

Структурно-технологическим резервом системы назовем множество технологических операций и их технологических схем, без которых система в целом может продолжать функционирование, возможно, с меньшей эффективностью. Структурно-технологический резерв системы — это множество ресурсов различных видов, за счет которых достигается технологическая гибкость системы, т. е. способность системы компенсировать технологические возмущения, такие как отказы и повреждение технологических звеньев, разрыв транспортных связей и т. д.

Теперь дадим определения рассматриваемых понятий в терминах модифицированных сетей Петри.

Рассмотрим нециклический технологический процесс, который задан как набор взаимосвязанных технологических операций S_i . Виды используемого в данном

технологическом процессе сырья и получаемой продукции обозначим как $\omega_j, j = \overline{1, J}$.

Построим сеть Петри $N = \langle P, T, F \rangle$, реализующую данный технологический процесс. Каждому производственному звену $s_i, i = \overline{1, S}$ поставим в соответствие переход $t_i \in T$, позиция $p_j^i \in P$ соответствуют некоторые емкости, в которых может находиться сырье или готовая продукция вида ω_j . Функциональное отличие переходов от позиций состоит в том, что в позициях, в отличие от переходов, не происходит преобразований изделий одного вида в изделия другого вида.

В нециклическом процессе можно выделить входную $p_{\text{вх}}$ и выходную позиции $p_{\text{вых}}$, на первую из них поступает сырье, а на вторую — готовая продукция — результат технологического процесса.

Определение 1. Технологической операцией s_i , выполняемой на производственном звене, назовем функции входного и выходного распределений маркеров на переходе t_i .

Множество всех технологических операций обозначим через S . Для каждой операции могут существовать несколько способов преобразования входного распределения маркеров в выходное распределение, задающихся парой функций λ и φ . Для каждого способа преобразования может быть также задан вектор характеристик $\bar{\tau}$, таких как время выполнения операции, стоимость выполнения и др.

Для одной и той же операции s_i может быть несколько возможных технологических схем T_i^k .

Определение 2. Технологической схемой T_i^k операции s_i назовем тройку функций:

$$T_i^k = \begin{cases} \lambda_i^k(p) - \text{функция входного распределения маркеров,} \\ \varphi_i^k(p) - \text{функция выходного распределения маркеров,} \\ \bar{\tau}_i^k - \text{вектор характеристик технологической схемы.} \end{cases}$$

В силу ацикличности технологического процесса, для каждой технологической операции s_i могут быть выделены два непересекающихся множества $P_i' = \{p_r'\}$, $r = \overline{1, n}$, и $P_i'' = \{p_s''\}$, $s = \overline{1, m}$, входных и выходных позиций. В сети Петри технологическая схема T_i^k для операции s_i задается переходом t_i^k следующим образом (рис. 1):

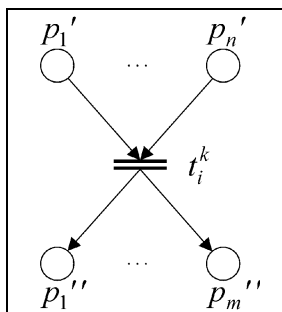


Рис. 1. Представление технологической схемы в сети Петри

При этом функция λ_i^k определяет кратность входных дуг для перехода t_i^k , а функция φ_i^k — кратность выходных.

Содержательно, функция λ_i^k задает минимальное количество ресурсов, необходимое для выполнения технологической операции, а функция φ_i^k — количество ресурсов, получаемое из этого минимального количества.

Вектор $\bar{\tau}_i^k$ также определяет ряд характеристик сети, такие как время выполнения операции, стоимость выполнения операции и др.

Определение 3. Технологической схемой процесса назовем такой набор технологических схем операций, при которых достижима конечная маркировка.

Конечной маркировкой в сети является маркировка, в которой в завершающей позиции $p_{\text{вых}}$ присутствуют маркеры.

Технологической схемой процесса в смысле сетей Петри служит некоторое слово l_i языка сетей Петри. Множество всех слов обозначим через $L = \{l_i\}, i = 1$.

2. СТОИМОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Будем рассматривать маркеры, присутствующие во входном и выходном распределениях технологической схемы T_i^k операции s_i как ресурсы, имеющие стоимостные характеристики $C(p_j) \geq 0$. Пусть элементы вектора характеристики операции $\tau_i^{k(l)} \in \bar{\tau}_i^k$ также имеют стоимость $C(\tau_i^{k(l)}) \geq 0$. При выполнении операции естественно стремиться к увеличению стоимости ресурсов на выходе при уменьшении стоимости ее выполнения и стоимости ресурсов на входе.

Обслуживание даже не задействованного в данный момент оборудования и поддержание его в работоспособном состоянии требует материальных затрат. Обозначим эти затраты через $\tau_i^{k(\text{обс})} \in \bar{\tau}_i^k$.

Определение 4. Стоимостью операции s_i при использовании технологической схемы $T_i^k = \{\lambda_i^k(p), \varphi_i^k(p), \bar{\tau}_i^k\}$ будем называть величину $C(s_i, T_i^k) = \sum_{p_j \in P} C(p_j) \cdot \varphi_i^k(p_j) -$

$$- \sum_{p_m \in P} C(p_m) \cdot \lambda_i^k(p_m) - \sum_{\tau_i^{k(l)} \in \bar{\tau}_i^k} C(\tau_i^{k(l)}) - \sum_{q=1, q \neq k}^{n_i} C(\tau_i^{q(\text{обс})}),$$

где n_i — число технологических схем операции s_i .

Таким образом, общая стоимость технологической схемы операции складывается из стоимости ресурсов на выходе минус стоимость входных ресурсов, минус стоимость выполнения операции и минус стоимость обслуживания всех ее технологических схем.

Стоимость незадействованной в данный момент операции $C(s_i, T_i^0) = - \sum_{q=1}^{n_i} C(\tau_i^{q(\text{обс})})$.

Определение 5. Суммарной функцией стоимости технологического процесса назовем сумму стоимостей всех операций, выполненных в процессе достижения конечного



результата $C(l) = \sum_{t_i^k \in l} C(s_i, T_i^k) - \sum_{t_j^q \in \bar{l}} C(\tau_i^{q(\text{обс})})$, где l — слово языка сети Петри N , полученное при достижении конечной маркировки, а \bar{l} — множество переходов из операций, которые не были задействованы при достижении конечной маркировки.

Слов l может быть несколько, и естественно использовать в технологическом процессе такую последовательность срабатывания переходов-операций l_0 , при которой достигается максимум: $C_0 = \max_{l \in L} C(l)$.

В дальнейшем будем предполагать, что используется именно эта схема, и возникающие аварийные ситуации затрагивают работу одного из звеньев, задействованных в данной схеме.

При нормальном функционировании технологической системы суммарная функция стоимости по всем ее операциям в большинстве случаев должна быть величиной неотрицательной из соображений рентабельности. При достижении этой функцией некоторого отрицательного порога можно говорить, что в системе сложилась ЧС. Кроме того, ЧС может возникнуть на отдельных операциях технологического процесса. Стоимость операций на данных участках технологической схемы может стать отрицательной, при этом стоимость для процесса в целом может оставаться положительной. Положительная стоимость процесса также может быть достигнута при использовании резервной технологической схемы. В таком случае будем говорить, что система обладает достаточным резервом при сложившейся ЧС, т. е. несмотря на ЧС на отдельных операциях, система продолжает функционировать без убытков. Кроме того, максимизируя стоимость процесса $C(l)$ по всем резервным технологическим схемам, можно выбрать оптимальную резервную технологическую схему при имеющихся повреждениях.

При возникновении ЧС в масштабах всей технологической системы, ее стоимость $C(l)$ принимает отрицательное значение либо за счет прекращения выдачи изделий на выходе, либо из-за увеличения времени выполнения операций. Если конечная маркировка становится недостижимой, то можно считать, что $C(l) = - \sum_{t_j^k \in T} C(\tau_i^{q(\text{обс})})$ — стоимость невыполненного процесса.

Поскольку при невозможности выполнения той или иной технологической схемы может потребоваться перестроение части технологической схемы процесса, то представляется целесообразным ввести понятие стоимости смены технологической схемы, которая используется для выполнения операции.

Через $\rho(s_i, T_i^1, T_i^2)$ будем обозначать затраты, требуемые для перехода с технологической схемы T_i^1 на схему T_i^2 для операции s_i . Эта величина будет определяться затратами на монтажные, пусконаладочные и прочие виды работ, связанных со сменой технологической цепочки. Для удобства расчетов доопределим эту функцию, положив $\rho(s_i, T_i^1, T_i^2) = 0$.

Определение 6. Функцией стоимости смены схемы технологической схемы T_i^1 на схему T_i^2 для операции s_i назовем величину $C(s_i, T_i^1, T_i^2) = C(s_i, T_i^1) + \rho(s_i, T_i^1, T_i^2) - C(s_i, T_i^2)$.

Таким образом, общая стоимость смены схемы складывается из стоимости исходной технологической схемы операции, плюс затраты на перенастройку и минус стоимость конечной технологической схемы операции.

Стоимость смены схемы будет тем больше, чем больше разность между стоимостью исходной и конечной технологическими схемами, а также чем больше затраты на перенастройку. При выборе схемы, на которую осуществляется переход, следует минимизировать рассматриваемую стоимость.

На основании понятия стоимости смены технологической схемы операции введем функцию стоимости смены схемы технологического процесса.

Определение 7. Функцией стоимости смены схемы технологического процесса назовем сумму стоимостей смены схем технологических операций процесса: $C(l', l'') = \sum_{t_i^k \in l'} C(s_i, T_i^k) + \sum_{i=1}^S \rho_i(l', l'') - \sum_{t_i^k \in l''} C(s_i, T_i^k)$, где слово l' задает исходную схему технологического процесса, слово l'' — схему, на которую осуществляется переход, а $\rho_i(l', l'')$ — стоимость смены технологической схемы для операции s_i .

Эта стоимость рассчитывается по правилу:

$$\rho_i(l', l'') = \begin{cases} \rho(s_i, T_i^{j_1}, T_i^{j_2}), & \text{если } \exists j_1, j_2, 1 \leq j_1, \\ & j_2 \leq n_i : t_i^{j_1} \in l' \text{ и } t_i^{j_2} \in l'' \\ \rho(s_i, T_i^{j_1}, T_i^0), & \text{если } \exists j_1, 1 \leq j_1 \leq n_i : t_i^{j_1} \in l', \\ & \text{и } \forall j_2, 1 \leq j_2 \leq n_i : t_i^{j_2} \notin l'' \\ \rho(s_i, T_i^0, T_i^{j_2}), & \text{если } \exists j_2, 1 \leq j_2 \leq n_i : t_i^{j_2} \in l'', \\ & \text{и } \forall j_1, 1 \leq j_1 \leq n_i : t_i^{j_1} \notin l'' \\ 0 & \text{— иначе.} \end{cases}$$

После выхода из строя звена s_j , входящего в используемую изначально схему процесса, и появления на этом звене поражающего фактора, потребуется переход на другую схему производства. В качестве заменяющей схемы может быть выбрана та допустимая схема, переход на которую потребует меньших затрат: $\min_{l \in L, t_j^k \notin l} C(l_0, l)$.

В этом выражении требование $t_j^k \notin l$ означает невозможность использования технологических схем вышедшего из строя звена s_j .

Недостаток такого метода выбора резервной схемы технологического процесса состоит в отсутствии учета возможности повторного возникновения ЧС на других производственных звеньях.

3. СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЗЕРВ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

В случае возникновения аварии может сложиться ситуация, в которой станет невозможным полностью или частично выполнять одну или несколько операций. И, как следствие аварии, выполнение части других операций производственного процесса станет невозможным или нецелесообразным. Множество таких операций и их технологических схем будем называть *аварийным множеством*. Множество операций, дублирующих выполнение вышедших из строя звеньев, будем называть *структурно-технологическим резервом* или *резервным множеством*.

Пусть $L = \{l\}$ — множество слов сети Петри. Каждому слову из него соответствует некая схема технологического процесса, а сами слова содержат последовательности сработавших переходов (примененных технологических схем) при достижении конечной маркировки.

Если применение используемой ранее на операции s_i технологической схемы T_i^n невозможно, то множество L разбивается на два непересекающихся подмножества: $L = L_A \cup L_P$, где L_A — множество слов, в которые входит переход t_i^n . Оно содержит те схемы процессов, которые станут неприменимыми после возникновения ЧС и при невозможности выполнения схемы T_i^n на операции s_i . L_P — множество слов, в которые переход t_i^n не входит. Оно содержит те схемы процессов, которые могут резервировать использование схемы T_i^n на операции s_i .

Как видно из построения, множества L_A и L_P не пересекаются.

Введем классификацию для переходов сети. Для этого рассмотрим их вхождения в слова из L_A и L_P . Возможны три класса переходов.

- Переходы, которые содержатся в словах из обоих множеств. Они могут выполняться как до возникновения ЧС, так и после. Исключим их из дальнейшего рассмотрения.
- Переходы, которые содержатся в словах из множества L_A , но не содержатся в словах из множества L_P . Эти переходы образуют *аварийное множество* R_A . Выполнение технологических схем, соответствующих этим переходам, становится невозможным или нецелесообразным.
- Переходы, которые содержатся в словах множества L_P , но не содержатся в словах из множества L_A . Они образуют *резервное множество* R_P . Его элементы выполняют дублирующую функцию в случае аварии.

Заметим, что в сети не существует переходов, не входящих ни в одно из множеств, поскольку такие переходы соответствовали бы неприменимым изначально технологическим схемам.

Аналогичным образом можно построить аварийное и резервное множества для операции s_i и совокупности технологических схем $T_i^{i_1}, \dots, T_i^{i_n}$, а также для операции в целом. Для этого при разделении множества слов L на два подмножества в качестве критерия разделения сле-

дует использовать наличие в словах l переходов $t_i^{i_1}, \dots, t_i^{i_n}$ в первом случае или всех переходов $t_i^{i_1}, \dots, t_i^{i_n}$ операции s_i во втором случае.

Введем некоторые характеристики сети, моделирующей производственную систему. Если после удаления из сети Петри N всех переходов, принадлежащих аварийному множеству $R_A(s_i)$, в полученной таким образом сети N_A остается достижимой конечная маркировка, то это означает, что рассматриваемая система обладает резервом при невозможности выполнения операции s_i . Набор последовательностей срабатывания переходов усеченной сети N_A , которые ведут к достижению конечной маркировки, назовем *резервной технологической схемой* производственной системы при невозможности выполнения операции s_i и будем обозначать как $L_P(s_i)$.

Определение 8. *Структурно-технологическим резервом системы (комплекса операций), заданной сетью Петри N , назовем множество переходов $R_N = \{t_i^k\}$ такое, что при удалении любого из этих переходов из исходной сети N остается достижимой конечная маркировка сети N .*

При выходе из строя любого единичного элемента, принадлежащего множеству R_N , технологический процесс продолжает выполняться, возможно, с меньшей эффективностью. При выходе из строя любого числа элементов, не принадлежащих множеству R_N , система перестает функционировать. Если повреждено более одной операции из множества R_N , то дать однозначный ответ относительно работоспособности системы нельзя.

Определение 9. *Множество \bar{R}_N (дополнение к множеству R_N) назовем множеством уязвимости системы (комплекса операций), заданной сетью N .*

В него войдут те элементы, повреждение которых влечет за собой выход из строя всей системы. Множество \bar{R}_N может быть получено включением в него тех и только тех переходов, которые принадлежат всем словам из языка L .

На множестве \bar{R}_N вводятся различные характеристики: число операций; число операций, отнесенное к общему числу операций системы; суммарная эффективность операций из этого множества при использовании любых технологических схем на этих операциях и др.

Введем ряд характеристик структурно-технологического резерва операции s_i .

Определение 10. *Множеством применимости структурно-технологического резерва операции s_i назовем множество переходов сети $\Gamma(s_i) = \{t_j^n\}$ таких, что найдется технологическая схема T_i^k рассматриваемой операции s_i и соответствующий этой схеме переход $t_i^k \in R_P(s_i, T_j^n)$.*

Другими словами, это множество технологических схем операций, для замены которых могут использоваться технологические схемы операции s_i .

Как было показано ранее, возможны различные варианты реагирования производственной системы на удаление из нее одной из операций — от понижения эф-



фективности до полного останова. Введем количественные характеристики этого реагирования.

Определение 11. Гибкостью $G(s_i)$ производственной системы относительно невозможности выполнения операции s_i назовем отношение числа технологических схем процесса $|L_p(s_i)|$, способных выполняться при невозможности выполнения операции s_i , к общему числу технологических схем процесса $|L|$, выполнимых при нормальном функционировании системы: $G(s_i) = |L_p(s_i)|/|L|$.

Как видно из определения, значение гибкости — отрицательное число, не превосходящее единицы. Если гибкость $G(s_i) = 0$, то при невозможности выполнения операции s_i вся система выходит из строя. Если гибкость $G(s_i) = 1$, то это значит, что операция s_i не используется ни в одной технологической схеме процесса и может быть без всякого ущерба удалена из производственной системы. Чем больше значение гибкости, тем меньше возникает потерь из-за невозможности выполнения операции s_i .

Для изучения гибкости системы в целом можно пользоваться значением средней гибкости: $G_{cp} =$

$$= \sum_{i=1}^S P(A_i) G(s_i), \text{ где } P(A_i) \text{ — вероятность отказа звена } s_i.$$

По аналогии с гибкостью относительно невозможности выполнения одной операции, можно утверждать, что чем больше значение средней гибкости системы, тем меньше возникает потерь из-за невозможности выполнения какой-либо операции.

Недостаток данного определения гибкости состоит в том, что оно не учитывает стоимостных характеристик потерь в результате ЧС. При расчете гибкости производственной системы указанным способом учитывается, сколько схем технологического процесса не сможет выполняться, но не учитывается их стоимость.

Для производственных звеньев можно рассчитать потери, вызванные выходом из строя технологического звена s_i . Предположим, что в качестве схемы, на которую будет осуществляться переход, была выбрана схема процесса, заданная словом l_i .

Определение 12. Затратами производственной системы $\bar{C}(s_i)$ относительно невозможности выполнения операции s_i назовем стоимость перехода на выбранную схему технологического процесса: $\bar{C}(s_i) = C(l_0, l_i)$.

Чем выше эта величина, тем большие потери вызовет невозможность выполнения операции s_i .

Определение 13. Долей сохраняемой стоимости систем относительно невозможности выполнения операции s_i назовем отношение стоимости замещающей схемы процесса к стоимости исходной схемы процесса: $\Phi(s_i) = C(l_i)/C(l_0)$.

Величина $\Phi(s_i)$ может быть отрицательной в случае, если после возникновения аварии система работает с убытками.

На основе вероятностей отказов звеньев и долей сохраняемой стоимости введем понятие гибкости производственной системы в целом.

Определение 14. Гибкостью производственной системы, заданной сетью Петри N , назовем величину $G_N =$

$$= \sum_{i=1}^S P(A_i) \Phi(s_i).$$

Эта величина характеризует способность производственной системы сохранять эффективную работу в случае возникновения ЧС на одном из ее участков. Чем она больше, тем большим структурно-технологическим резервом обладает производственная система и, как следствие, тем она устойчивее к возникающим на ней авариям в целом.

Может возникнуть вопрос о сравнении способов реагирования различных производственных систем, реализующих одну и ту же функцию, на возникающие на них аварии. Поскольку в этих системах может быть разное число операций s_i , то их сопоставление путем сравнения средних значений гибкости не показательно. Поясним это утверждение на следующем примере.

Пусть построены сети Петри N_1 и N_2 двух производственных систем, реализующих одну и ту же функцию. Число операций в первой $|S_1| = 5$, во второй — $|S_2| = 20$. Пусть гибкости обеих систем равны: $G_{N_1} = G_{N_2} = 0,9$.

Это означает, что при невозможности выполнения одной операции из строя выходит 10% технологических схем в обеих системах. Но дело в том, что невозможность выполнения одной операции означает выход из строя 20% операций в первой системе и 5% операций во второй. Следовательно, сравнивать системы с различным числом операций, основываясь только на значении средней гибкости, нельзя.

Для преодоления этого недостатка следует учитывать долю вышедших из строя операций. При невозможности выполнения одной операции эта доля составит $1/|S|$ от общего числа операций. Доля вышедших из строя производственных схем процесса, при аварии на операции s_i , составит $(|L| - |L_i|)/|L|$, где $|L|$ — число всех технологических схем процесса, а $|L_i|$ — число технологических схем процесса, выполнение которых становится невозможным при аварии на операции s_i .

Рассчитаем среднюю долю выходящих из строя технологических схем при невозможности выполнения одной операции производственной системы:

$$\begin{aligned} \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} \frac{|L| - |L_i|}{|L|} &= \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} \left(1 - \frac{|L_i|}{|L|}\right) = \frac{|S|}{|S|} - \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} \frac{|L_i|}{|L|} = \\ &= 1 - \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} G(s_i) = 1 - G_{cp}. \end{aligned}$$

Введем понятие устойчивости производственной системы.

Определение 15. Устойчивостью H производственной системы относительно невозможности выполнения части ее операций назовем отношение доли выходящих из строя операций к доле технологических схем процессов, выполнение которых стало невозможным.

В случае невозможности выполнения одной операции устойчивость $H = \frac{1}{|S|(1 - G_{cp})}$.

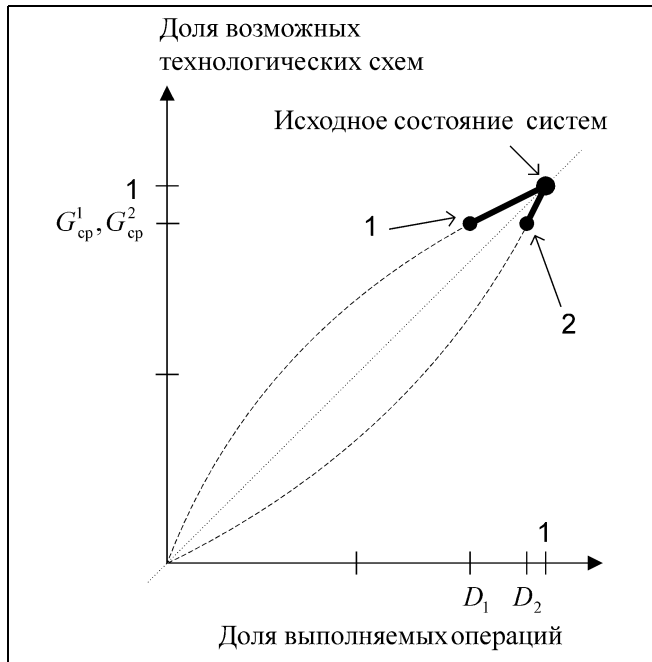


Рис. 2. Зависимость доли технологических схем процессов от доли выполняемых операций

При вычислении устойчивости учитывается доля невыполняемых операций, что позволяет сравнивать производственные системы различного масштаба.

Для приведенного выше примера устойчивость $H_1 = \frac{1}{|S_1| \cdot (1 - G_{cp}^1)} = \frac{1}{5 \cdot 0,1} = 2$ для первой производственной системы и $H_2 = \frac{1}{|S_2| \cdot (1 - G_{cp}^2)} = \frac{1}{20 \cdot 0,1} = 0,5$ — для второй.

Можно утверждать, что первая система сохраняет большую работоспособность при возникновении на ней аварий, поскольку $H_1 > H_2$.

Поясним сказанное с помощью рис. 2.

На нем изображены зависимости доли возможных технологических схем процессов от доли выполняемых операций. Точки 1 и 2 показывают состояние производственных систем при невозможности выполнения одной операции, а D_1 и D_2 — доли выполняемых операций, которые вычисляются как $D_1 = (|S_1| - 1)/|S_1| = 0,8$ и $D_2 = (|S_2| - 1)/|S_2| = 0,95$.

Если для первой производственной системы доля выполняемых операций будет сокращаться и дальше, то доля возможных технологических схем процессов будет сокращаться не так сильно и образует верхнюю кривую, изображенную на рисунке ($H > 1$). Для второй производственной системы сокращение доли выполняемых операций будет вызывать резкое снижение доли возможных технологических схем. На рисунке это будет соответствовать нижней кривой ($H < 1$).

Можно сделать следующие заключения о зависимости способности производственной системы сохранять выполнимые технологические схемы процессов при возникновении аварий от значения устойчивости.

- Если значение устойчивости производственной системы ($H < 1$), то при возникновении некрупных аварий и при невозможности выполнения небольшого числа операций число возможных технологических схем процессов, сохраняющихся в работоспособном состоянии, резко снижается. Производственные системы такого рода крайне чувствительны к возникающим на них авариям.
- Если значение устойчивости производственной системы ($H > 1$), то при возникновении даже относительно крупных аварий и невозможности выполнения части операций число возможных технологических схем процессов остается достаточно большим. Производственные системы такого рода менее чувствительны к возникающим авариям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введенное понятие структурно-технологического резерва позволяет выделять совокупности операций и их технологических схем, за счет которых достигается технологическая гибкость системы, т. е. способность системы компенсировать технологические возмущения, такие как отказы и повреждения технологических звеньев, разрыв транспортных связей и т. д. С учетом характеристик производственных систем, введенных на основе структурно-технологического резерва, становится возможным выделять их наиболее уязвимые места.

В дальнейшем, на основании модели производственных систем на языке сетей Петри, могут быть разработаны формальные методы модификации производственных систем, повышающие их устойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архипова Н. И., Кульба В. В. Управление в чрезвычайных ситуациях. — М.: РГГУ, 1998.
2. Dimitrovici C., Hummert U., Petrucci L. Semantics, composition and net properties of algebraic high-level nets // LNCS. — 1991. — Vol. 524.
3. A unified high-level Petri net formalism for time-critical systems // C. Ghezzi, D. Mandrioli, S. Morasca, M. Pezzi // IEEE Trans. on Software Engineering. — 1991. — February.
4. Stochastic well-formed coloured nets and symmetric modelling applications // G. Chiola, C. Dutheillet, G. Franceschinis, S. Haddad // IEEE Trans. on Computers. — 1993. — Vol. 42, N 11.
5. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К., Филиппов В. А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. — М.: Наука, 1985.
6. Субботин В. Е. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. — Волгоград, Волгогр. гос. техн. ун-т, 1996.

☎ (095) 334-90-09

E-mail: kulba@ipu.ru

□