

АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ ПОСТАВОК ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ СПРОСАХ КЛИЕНТОВ

А.Н. Павлов, Д.А. Павлов, А.Ю. Кулаков, А.Б. Умаров (Санкт-Петербург)

Введение. В условиях современной экономики и ведения бизнеса повышение надежности и живучести цепей поставок (ЦП) необходимо по целому ряду причин [1], среди которых можно выделить две ключевые. Во-первых, это постоянно растущие запросы со стороны потребителей: для удовлетворения их потребностей необходимо постоянное наличие нескольких разновидностей одного и того же продукта. Во-вторых, всегда существует потребность построения наиболее коротких и быстрых цепей поставок. Эти две причины являются наиболее важными для современных перенасыщенных рынков, когда предприятия должны не только привлечь к себе интерес клиентов своих конкурентов, но и не растерять своих уже существующих покупателей [2]. Таким образом, предприятия вынуждены снижать затраты в своих ЦП и, вместе с тем, удовлетворять потребности клиентов, в противном случае они рискуют утратить конкурентоспособность. Конечный потребитель продукции стал важнейшим звеном в современном управлении цепями поставок.

Функционирование ЦП связано со значительной неопределенностью и риском. Неопределенность – это общесистемное свойство, связанное с ограниченностью знаний о состоянии внешней среды системы (цепи поставок). Риск возникает из-за неопределенности и понимается как вероятность или возможность негативного исхода события, приводящего к убыткам/потерям в цепи поставок [2].

Всё вышесказанное предопределяет необходимость исследования структурно-функциональных свойств адаптивных цепей поставок (АЦП) с позиций рассмотрения их как сложных систем [3]. Неизбежное возрастание структурной и функциональной сложности цепей поставок приводит к распространению методов, учитывающих не только числовые значения показателей надежности составляющих их функциональных элементов (ФЭ), к которым в случае цепей поставок могут быть отнесены склады, заводы-изготовители, поставщики, дистрибуторы и т.д., но и более общие оценки влияния отказов элементов на функционирование всей рассматриваемой ЦП, а именно, оценки критичности отказов элементов [4].

Определение степени критичности отказа для каждого ФЭ ЦП дает возможность фокусировать внимание на совершенствовании узлов, играющих ключевую роль в успешном функционировании ЦП [5]. Критичность отказов элементов следует рассматривать как комплексное свойство, включающее в себя ряд частных показателей: структурная значимость; устойчивость ФЭ к негативному воздействию извне; вероятность отказа; степень резервирования элемента и т.д. [6].

Кроме всего прочего, важным является тот факт, что при проектировании и создании ЦП в ходе решения различных задач оценивания, анализа и синтеза её облика требуется учитывать различные варианты поступления заказов клиентов, которые значительно влияют на структурно-функциональную надежность и живучесть ФЭ, подсистем и всей ЦП в целом [4].

В настоящей работе представлены результаты исследования структурной значимости ФЭ (выявления критичности отказов ФЭ с позиции их структурного построения) адаптивных цепей поставок в зависимости от характера и интенсивности поступления динамических заказов клиентов.

Подход к оцениванию структурной значимости функциональных элементов адаптивной цепи поставок на основе концепции параметрического генома структуры.

При оценивании структурной значимости ФЭ ЦП предлагается использовать возможности общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) и программного комплекса логико-вероятностного моделирования (ПК ЛВМ) «Арбитр» [7]. Используя универсальное графическое средство структурного представления исследуемых свойств сложных объектов (СЛО), построим схему функциональной целостности (СФЦ) ЦП, являющуюся графическим представлением логических условий реализации собственных функций ФЭ, а также целей моделирования – логических условий реализации исследуемого свойства и рассчитаем вероятностный полином успешного функционирования ЦП [5,6]. При определении данного полинома будем учитывать условия совместного и раздельного поступления динамических заказов клиентов.

Пусть вероятностный полином успешного функционирования ЦП (обслуживание клиентов) имеет вид (1)

$$\mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m}), \quad (1)$$

где $P_i (Q_i = 1 - P_i), i = 1, \dots, n$ – вероятности безотказной работы (отказа) ФЭ ЦП, а $P_{n+i} (Q_{n+i} = 1 - P_{n+i}), i = 1, \dots, m$ – можно интерпретировать как относительный размер (интенсивность) от 0 до 1 поступления (отсутствия) заказа клиента на рассматриваемом интервале времени. Обозначим интенсивности поступления заказов через $\alpha_i = P_{n+i}, i = 1, \dots, m$.

Используя параметрический геном структуры [8] ЦП $\overset{r}{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m))^T$ – вектор, элементами которого являются коэффициенты вероятностного полинома (2) успешного функционирования ЦП для случая однородной структуры (равная вероятность безотказной работы ФЭ $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$),

$$\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n, \quad (2)$$

рассчитаем показатели структурно-функциональной надежности для однородной и неоднородной структуры ЦП по формулам (3) [8]

$$F_{однор}(\overset{r}{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \dots, \alpha_m) dP = \overset{r}{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T,$$

$$F_{неоднор}(\overset{r}{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \overset{r}{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T, \quad (3)$$

$$F_{однорвозм}(\overset{r}{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \sup_{\gamma \in [0,1]} \min \{ \gamma, G(\{ \mu | \mathfrak{R}(\mu, \alpha_1, \dots, \alpha_m) \geq \gamma \}) \}.$$

Для оценки значимости ФЭ ЦП с учетом колебаний спроса вычислим полином (4), который будем называть полиномом значимости. Данный полином получается дифференцированием вероятностного полинома успешного функционирования ЦП по коэффициенту готовности (вероятности безотказной работы) i -го элемента [7]

$$\xi_i(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \frac{\partial \mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m)}{\partial P_i} = \mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) \Big|_{P_i=1} - \mathfrak{R}(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) \Big|_{P_i=0}. \quad (4)$$

Поставим в соответствие каждому полученного полиному значимости $\xi_i(P_1, \dots, P_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) (\forall i = 1, \dots, n)$ параметрический геном $\overset{r}{\chi}^i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, подстановкой которых в формулы (3) можно вычислить структурные значимости ФЭ однородных и

неоднородных ЦП. Необходимо отметить, что структурная значимость ФЭ ЦП зависит от характера и интенсивности поступления динамических заказов клиентов. Получаем, что кроме раздельного или совместного поступления заказов, интенсивности поступления могут быть равноценными ($\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = \alpha$) или неравноценными. Для указанных в качестве примера четырех вариантов поступления динамических заказов клиентов, используя подход, предложенный в работах [4,7], для исследования структурной значимости функциональных элементов цепи поставок введем представленные ниже интегральные показатели (5)-(8)

$$J_{pp} = m \cdot \int_0^{1/m} F_*^{\Gamma}(\chi_p(\alpha)) d\alpha, \quad (5)$$

$$J_{cp} = \int_0^1 F_*^{\Gamma}(\chi_c(\alpha)) d\alpha, \quad (6)$$

$$J_{pn} = m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*^{\Gamma}(\chi_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m, \quad (7)$$

$$J_{cn} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*^{\Gamma}(\chi_c(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m, \quad (8)$$

Прокомментируем введенные интегральные показатели. Показатели (5) и (6) предназначены для вычисления структурной значимости ФЭ однородной и неоднородной цепей поставок при соответственно раздельном и совместном поступлении равноценных по интенсивности заказов клиентов, а показатели (7) и (8) - при соответственно раздельном и совместном поступлении неравноценных по интенсивности заказов. Очевидно, что в качестве функции F_* в формулах (5)-(8) могут быть использованы $F_{однор}$, $F_{неоднор}$ или $F_{однорвозм}$ для соответствующих параметрических геномов $\chi_p^{\Gamma}(\alpha)$, $\chi_c^{\Gamma}(\alpha)$, $\chi_p^{\Gamma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$, $\chi_c^{\Gamma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$.

Здесь

$$\chi_p^{\Gamma}(\alpha) = \chi_p^i(\alpha), \chi_c^{\Gamma}(\alpha) = \chi_c^i(\alpha), \chi_p^{\Gamma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = \chi_p^i(\alpha_1, \dots, \alpha_m), \chi_c^{\Gamma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = \chi_c^i(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$$

($\forall i=1, \dots, n$) соответственно параметрические геномы структурной значимости ФЭ ЦП при раздельном (несовместном) поступлении равноценных по интенсивности заказов клиентов, при совместном поступлении равноценных по интенсивности заказов, при раздельном поступлении неравноценных по интенсивности заказов, при совместном поступлении неравноценных по интенсивности заказов клиентов.

Формулы упрощенного вычисления значений интегральных показателей структурной значимости

На основании всего, сказанного выше, воспользуемся формулами (5)-(8) для расчета значений показателей структурной значимости ФЭ ЦП с учетом характера и интенсивности поступления динамических заказов клиентов. Обозначим параметрический геном полинома значимости конкретно взятого ФЭ для случая неравноценных (равноценных) по интенсивности поступлений заказов клиентов через $\chi^{\Gamma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ ($\chi^{\Gamma}(\alpha)$). Тогда для однородной или неоднородной структуры в качестве F_* в формулах (5)-(8) используем либо

$$F_*^{\Gamma}(\chi(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \chi^{\Gamma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T, F_*^{\Gamma}(\chi(\alpha)) = \chi^{\Gamma}(\alpha) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T,$$

либо

$$F_*(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T, F_*(\vec{\chi}(\alpha)) = \vec{\chi}(\alpha) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T.$$

Использование полинома успешного функционирования ЦП (1) дает возможность определять параметрические геномы как всей цепи поставок, так и значимостей её ФЭ. Важно, что уравнение (1) имеет вид многочлена [7], одночлены которого включают переменные со степенью либо 0, либо 1. Тогда в самом общем виде подынтегральная функция представима следующим образом (9)

$$F_*(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \alpha_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \alpha_i \alpha_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \sum_{k=j+1}^m \beta_{ijk} \alpha_i \alpha_j \alpha_k + \dots + \beta_{12\dots m} \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m. \quad (9)$$

Используя выражение (9), вычислим интегральные показатели структурной значимости ФЭ однородной или неоднородной ЦП.

Нетрудно заметить, что формулы (5), (6) и (8) примут следующий вид

$$J_{pp} = m \cdot \int_0^{1/m} F_*(\vec{\chi}(\alpha)) d\alpha = m \cdot \int_0^{1/m} (\beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \alpha + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \alpha^2 + \dots + \beta_{12\dots m} \alpha^m) d\alpha =$$

$$= \frac{\beta_0}{m^0 \cdot 1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{m \cdot 2} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{m^2 \cdot 3} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{m^m \cdot (m+1)},$$

$$J_{cp} = \int_0^1 F_*(\vec{\chi}(\alpha)) d\alpha = \int_0^1 (\beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \alpha + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \alpha^2 + \dots + \beta_{12\dots m} \alpha^m) d\alpha =$$

$$= \frac{\beta_0}{1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{2} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{3} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{(m+1)},$$

$$J_{cn} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 F_*(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m =$$

$$= \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 (\beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \alpha_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \alpha_i \alpha_j + \dots + \beta_{12\dots m} \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m =$$

$$= \frac{\beta_0}{2^0} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{2^1} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{2^2} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{2^m}.$$

Преобразовав формулу (7), получим следующее выражение

$$J_{pn} = m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} F_*(\vec{\chi}_p(\alpha_1, \dots, \alpha_m)) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m =$$

$$= m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} (\beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \alpha_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \alpha_i \alpha_j + \dots + \beta_{12\dots m} \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m =$$

$$= \frac{\beta_0}{1} + \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i}{m+1} + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij}}{(m+1) \cdot (m+2)} + \dots + \frac{\beta_{12\dots m}}{(m+1) \cdot (m+2) \cdot \dots \cdot (m+m)}.$$

Здесь значение интеграла от любого монома, состоящего из $k \leq m$ различных переменных и входящего в полином (9), является константой, равной

$$\begin{aligned}
& m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} \alpha_{i_1} \cdot \alpha_{i_2} \cdot \dots \cdot \alpha_{i_k} d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m = \\
& = m! \int_0^1 \alpha_1 d\alpha_1 \int_0^{1-\alpha_1} \alpha_2 d\alpha_2 \dots \int_0^{1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_{k-1}} \alpha_k d\alpha_k \int_0^{1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_k} d\alpha_{k+1} \dots \int_0^{1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_{m-1}} d\alpha_m.
\end{aligned}$$

Проинтегрировав данный моном по переменным $\alpha_{k+1}, \alpha_{k+2}, \dots, \alpha_m$, получим следующее выражение

$$\frac{m!}{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (m-k)} \cdot \int_0^1 \alpha_1 d\alpha_1 \int_0^{1-\alpha_1} \alpha_2 d\alpha_2 \dots \int_0^{1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_{k-1}} (1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_k)^{m-k} \cdot \alpha_k d\alpha_k.$$

Последний интеграл данного выражения равен

$$\int_0^{1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_{k-1}} (1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_k)^{m-k} \cdot \alpha_k d\alpha_k = \frac{(1-\alpha_1-\alpha_2-\dots-\alpha_{k-1})^{m-k+2}}{(m-k+1) \cdot (m-k+2)}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}
& m! \cdot \iiint_{\substack{\alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i=1, \dots, m}} \alpha_{i_1} \cdot \alpha_{i_2} \cdot \dots \cdot \alpha_{i_k} d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_m = \\
& = \frac{m!}{m! \cdot (m+1) \cdot (m+2) \cdot \dots \cdot (m+k-2)} \cdot \int_0^1 (1-\alpha_1)^{m+k-2} \cdot \alpha_1 d\alpha_1 = \frac{1}{(m+1) \cdot (m+2) \cdot \dots \cdot (m+k)}.
\end{aligned}$$

Результаты расчета структурной значимости ФЭ ЦП в условиях колебания спроса

Проведем исследование структурной значимости ФЭ некоторой адаптивной цепи поставок в условиях колебания спроса (различные интенсивности поступления динамических заказов клиентов). В представленной статье будем использовать результаты, полученные в работе [4]. Приведем некоторые из них. В качестве ФЭ, как уже указывалось выше, для АЦП могут выступать заводы-производители, склады, поставщики, дистрибуторы, провайдеры и др. СФЦ АЦП с учетом различных вариантов поступления динамических заказов клиентов представлена на рисунке 1.

Отметим, что в представленной СФЦ вершины 1-10 отражают работоспособность (вероятность безотказной работы) ФЭ некоторой АЦП, вершины 11-14 отражают вероятность поступления заказов клиентов (либо могут интерпретироваться как интенсивности поступления динамических заказов клиентов), вершины 15-34 являются фиктивными и описывают логические взаимосвязи элементов цепи поставок.

С помощью ПК ЛВМ «Арбитр» [7], получим для СФЦ АЦП два многочлена, отражающих вероятность ее успешного функционирования (10)

$$\mathcal{R}_c(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14}, Q_1, \dots, Q_{10}, Q_{11}, \dots, Q_{14}), \mathcal{R}_p(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14}, Q_1, \dots, Q_{10}, Q_{11}, \dots, Q_{14}), \quad (10)$$

где $\mathcal{R}_c(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14}, Q_1, \dots, Q_{10}, Q_{11}, \dots, Q_{14})$ - функция вероятности удовлетворения поступающих заказов клиентов, не являющихся группой несовместных событий (ГНС); $\mathcal{R}_p(P_1, \dots, P_{10}, P_{11}, \dots, P_{14}, Q_1, \dots, Q_{10}, Q_{11}, \dots, Q_{14})$ - функция вероятности удовлетворения поступающих заказов клиентов, представляющих ГНС; $P_i(Q_i), i=1, \dots, 10$ - вероятности безотказной работы (отказа) функциональных элементов АЦП, а $P_{10+i}(Q_{10+i}), i=1, \dots, 4$ - интенсивности поступления динамических заказов клиентов.

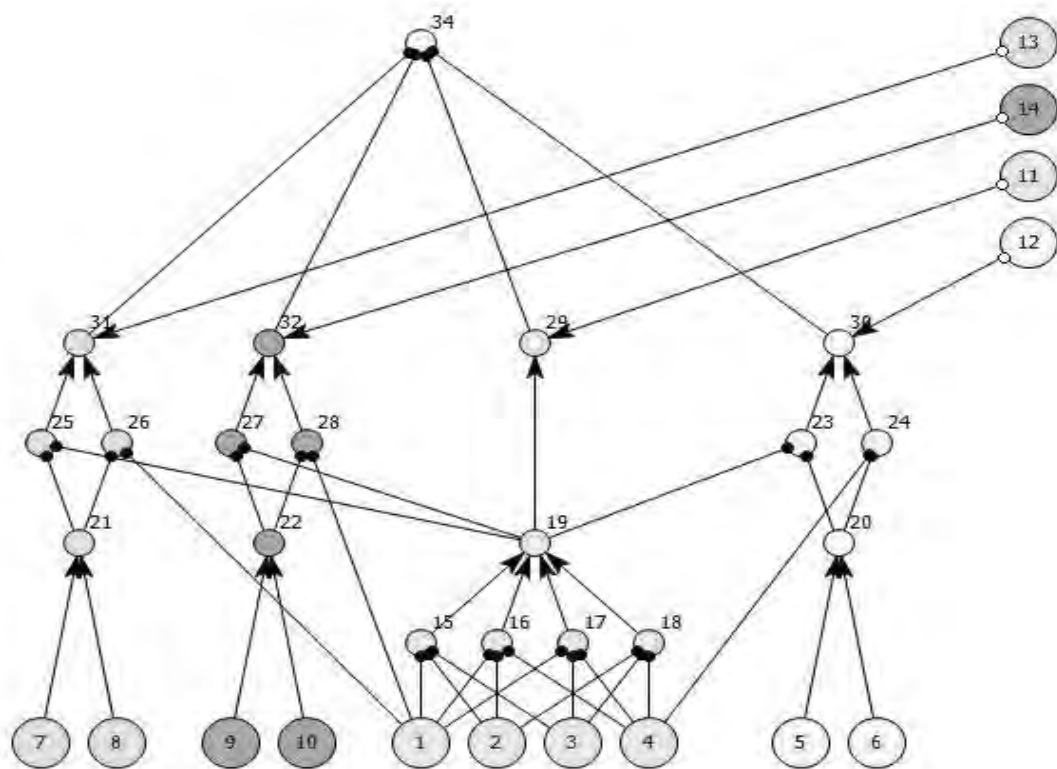


Рис.1 – Схема функциональной целостности ФЭ ЦП

Определив для каждого i -го ФЭ полином значимости по формуле (4) для случаев наличия и отсутствия ГНС среди поступающих заказов клиентов и соответствующие им параметрические геномы $\chi_c^i(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$, $\chi_p^i(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$, вычислим полиномы (9) для однородной ($F_{однор}(\chi_c^i(\alpha_1, \dots, \alpha_4))$, $F_{однор}(\chi_p^i(\alpha_1, \dots, \alpha_4))$) и неоднородной ($F_{неоднор}(\chi_c^i(\alpha_1, \dots, \alpha_4))$, $F_{неоднор}(\chi_p^i(\alpha_1, \dots, \alpha_4))$) структуры адаптивной цепи поставок.

Таким образом, например, для ФЭ, представленного на СФЦ АЦП вершиной 1, полученные многочлены (9) примут следующий вид

$$F_{однор}(\chi_c^1(\alpha_1, \dots, \alpha_4)) = 0,25\alpha_1 + 0,066667\alpha_2 + 0,433333\alpha_3 + 0,433333\alpha_4 - 0,116667\alpha_1\alpha_2 - 0,483333\alpha_1\alpha_3 - 0,483333\alpha_1\alpha_4 - 0,46429\alpha_2\alpha_3 - 0,13095\alpha_2\alpha_4 - 0,55357\alpha_3\alpha_4 + 0,482143\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 0,14881\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 0,577381\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 0,386508\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 0,40079\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4,$$

$$F_{неоднор}(\chi_c^1(\alpha_1, \dots, \alpha_4)) = 0,375\alpha_1 + 0,09375\alpha_2 + 0,65625\alpha_3 + 0,65625\alpha_4 - 0,1875\alpha_1\alpha_2 - 0,75\alpha_1\alpha_3 - 0,75\alpha_1\alpha_4 - 0,5\alpha_2\alpha_3 - 0,4375\alpha_2\alpha_4 - 0,82031\alpha_3\alpha_4 + 0,523438\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 0,460938\alpha_1\alpha_2\alpha_4 + 0,851563\alpha_1\alpha_3\alpha_4 + 0,5625\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 0,57617\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4,$$

$$F_{однор}(\chi_p^1(\alpha_1, \dots, \alpha_4)) = 0,25\alpha_1 + 0,066667\alpha_2 + 0,433333\alpha_3 + 0,433333\alpha_4,$$

$$F_{неоднор}(\chi_c^1(\alpha_1, \dots, \alpha_4)) = 0,375\alpha_1 + 0,09375\alpha_2 + 0,65625\alpha_3 + 0,65625\alpha_4.$$

Результаты проведенных вычислений структурной значимости ФЭ при совместном (без учета ГНС) и раздельном (с учетом ГНС) поступлении равноценных или неравноценных по интенсивности заказов однородной или неоднородной структуры АЦП приведены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1 – Значения структурной значимости ФЭ адаптивной цепи поставок

Номера критических ФЭ	Раздельное поступление заказов				Совместное поступление заказов			
	Равноценные		Неравноценные		Равноценные		Неравноценные	
	неоднор	однор	неоднор	однор	неоднор	однор	неоднор	однор
ФЭ1	0,22266	0,14792	0,35625	0,23667	0,22656	0,16617	0,29309	0,20794
ФЭ2	0,08203	0,05625	0,13125	0,09000	0,14160	0,11119	0,17224	0,13008
ФЭ3	0,08203	0,05625	0,13125	0,09000	0,14082	0,11000	0,17126	0,12860
ФЭ4	0,15234	0,10208	0,24375	0,16333	0,18438	0,13927	0,23157	0,16895
ФЭ5	0,03516	0,02292	0,05625	0,03667	0,06322	0,04474	0,07166	0,04878
ФЭ6	0,03516	0,02292	0,05625	0,03667	0,06322	0,04474	0,07166	0,04878
ФЭ7	0,03516	0,02292	0,05625	0,03667	0,06517	0,04508	0,07556	0,04998
ФЭ8	0,03516	0,02292	0,05625	0,03667	0,06595	0,04627	0,07654	0,05146
ФЭ9	0,03516	0,02292	0,05625	0,03667	0,06517	0,04508	0,07556	0,04998
ФЭ10	0,03516	0,02292	0,05625	0,03667	0,06595	0,04627	0,07654	0,05146

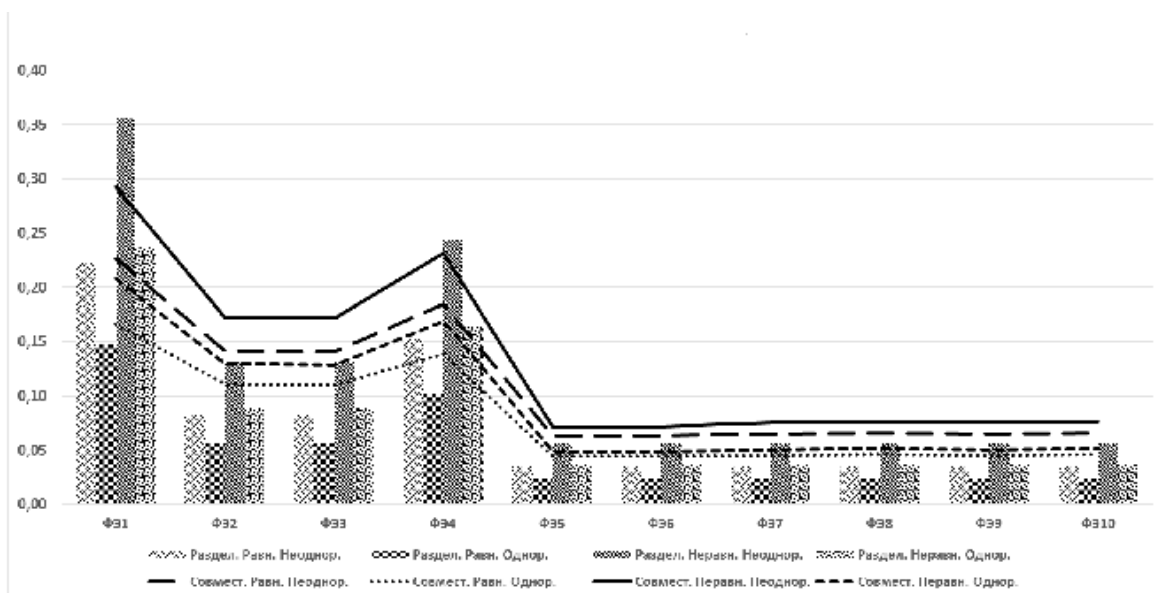


Рис.2 – Структурная значимость ФЭ адаптивной цепи поставок в условиях колебания спроса

Анализ результатов, полученных выше, позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, для любого варианта поступления динамических заказов клиентов наивысший приоритет в отношении значимости имеют ФЭ1, ФЭ2, ФЭ3, ФЭ4. Причем наиболее структурно значимым является ФЭ1, за ним следует ФЭ4, затем – ФЭ2 и ФЭ3. Максимальную значимость данные элементы приобретают в случае раздельного (несовместного) поступления неравноценных по интенсивности заказов, когда ЦП состоит из неоднородных по вероятности безотказной работы функциональных элементов. Другие функциональные элементы обладают приблизительно равной значимостью, значительно отличающейся от значимостей первых четырех элементов.

Во-вторых, если количественную величину структурной значимости первого функционального элемента цепи поставок принять за 1, то в случае поступления заказов, представляющих собой ГНС, структурная значимость остальных ФЭ будет

иметь следующие доли от этого значения (независимо от равноценности поступления заказов клиентов и однородности структуры АЦП): для ФЭ4 она составляет 0,68-0,69, для ФЭ2 и ФЭ3 – 0,37-0,38, для прочих – около 0,15. При совместном (параллельно-последовательном) поступлении заказов клиентов (независимо от равноценности поступления заказов и однородности структуры АЦП) эти доли составят: для ФЭ4 0,79-0,84, для ФЭ2 и ФЭ3 – 0,59-0,67, для прочих составит приблизительно 0,23-0,29. Иначе говоря, при совместном поступлении динамических заказов клиентов при достижении цели АЦП-удовлетворения заказов клиентов, структурная значимость первых четырех ФЭ становится более однородной, тогда как для других она возрастает в два раза в отличие от варианта раздельного (несовместного) поступления заказов клиентов.

Заключение

Для исследования структурной значимости элементов адаптивной цепи поставок был определен вероятностный полином значимости каждого элемента как результат дифференцирования вероятностного полинома успешного функционирования ЦП по переменной, характеризующей вероятность безотказной работы данного структурного элемента. Используя концепцию параметрического генома и введенные ранее формулы расчета структурно-функциональной надежности ЦП, вычислены показатели структурной значимости функциональных элементов адаптивной цепи поставок, характеризующие вклады в структурно-функциональную надежность ЦП при переводе элементов из неработоспособного состояния в работоспособное с учетом характера и интенсивности поступления динамических заказов клиентов. Предложены и определены формулы упрощенного вычисления значений интегральных показателей структурной значимости элементов. Рассмотрен пример вычисления структурной значимости элементов адаптивной цепи поставок в условиях колебания спроса. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что особенности колебания спроса (изменения характера и интенсивности поступления заказов) влияют на значения структурной значимости функциональных элементов цепей поставок.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№19–08–00989, № 20-08-01046), в рамках бюджетной темы №0073–2019–0004.

Литература

1. **Иванов Д.А., Соколов Б.В.** Адаптивное управление цепями поставок. Лондон: Springer, с. 269 (2010).
2. **Иванов Д.А., Иванова М.А.** Неопределенность и риски в цепях поставок: классификация проблем и направления будущих исследований // Российский журнал менеджмента. 13 (2), 2015. С. 99-128.
3. **Иванов Д.А., Соколов Б.В., Павлов А.Н.** Точные и эвристические методы анализа надежности интегрированной цепи поставок // Международный журнал интегрированного управления поставками. 10(2), 2016. С. 206-224.
4. **Pavlov, A.N., Pavlov, D.A., Vorotyagin, V.N., Umarov, A.B.** Structural and Functional Analysis of Supply Chain Reliability in the Presence of Demand Fluctuations // Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020, pp. 61-66, MMRIST (2020).
5. **Алешин Е.Н., Зиновьев С.В., Копкин Е.В., Осипенко С.А., Павлов А.Н., Соколов Б.В.** Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник // СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. 357 с.

6. **Mehdi Jafari.** Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // *Aerospace Science and Technology*, 2015. Vol. 47. pp. 467-472.
7. Применение общего логико–вероятностного метода для анализа технических, военных организационно–функциональных систем и вооруженного противоборства: монография, научное издание / В.И. Поленин, И.А. Рябинин, С.К. Свирин, И.А. Гладкова; под ред. А.С. Можяева. СПб.: СПб региональное отделение РАЕН, 2011. 416 с.
8. **Копытов Е.А., Павлов А.Н., Зеленцов В.А.** Новые методы расчета генома структуры и критичности отказа элементов сложных объектов // *Транспорт и связь*, 11(4), 2010. С. 4-13.