



Структурное резервирование на автомобильном транспорте



Валерий КУРГАНОВ
Valery M. KURGANOV

Михаил ГРЯЗНОВ
Mikhail V. GRYAZNOV



Курганов Валерий Максимович — доктор технических наук, профессор Тверского государственного университета, Тверь, Россия. Грязнов Михаил Владимирович — кандидат технических наук, доцент Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Авторы рассматривают надежность технических систем как научную категорию и объект приложения методологических средств, помогающих оценить искомые показатели, найти подходящие задаче критерии и способы включения резервов. Приоритетное направление — структурное резервирование, классификация его видов, проекции расчетных вариантов на специфику автомобильных перевозок. Демонстрируемые подходы опираются на теорию надежности, теорию систем, законы логики, булевские функции.

Ключевые слова: теория надежности, структурное резервирование, классификация способов, резервные каналы доставки, гипотезы безотказности, надежность транспортного процесса.

Согласно толковому словарю русского языка, «надежный» означает внушающий доверие, верный. Применительно к человеку термин «надежность» используется как характеристика его положительных качеств: пунктуальности, обязательности, верности, ответственности. В технике надежность представляет собой свойство системы сохранять свои выходные параметры в допустимых пределах, закладываемое на стадии проектирования. В деловой среде надежность является неотъемлемым условием успешного бизнеса, залогом стабильности результатов компании, динамики ее развития.

НАДЕЖНОСТЬ КАК НАУЧНАЯ КАТЕГОРИЯ

Независимо от объекта приложения, проблеме повышения надежности всегда уделяется большое внимание. Для ее изучения сформировано отдельное научное направление — теория надежности, примерами основополагающих трудов для нее являются, в частности, исследования целого ряда отечественных [3, 5, 13] и зарубежных [1, 11, 14] ученых. Наиболее из-

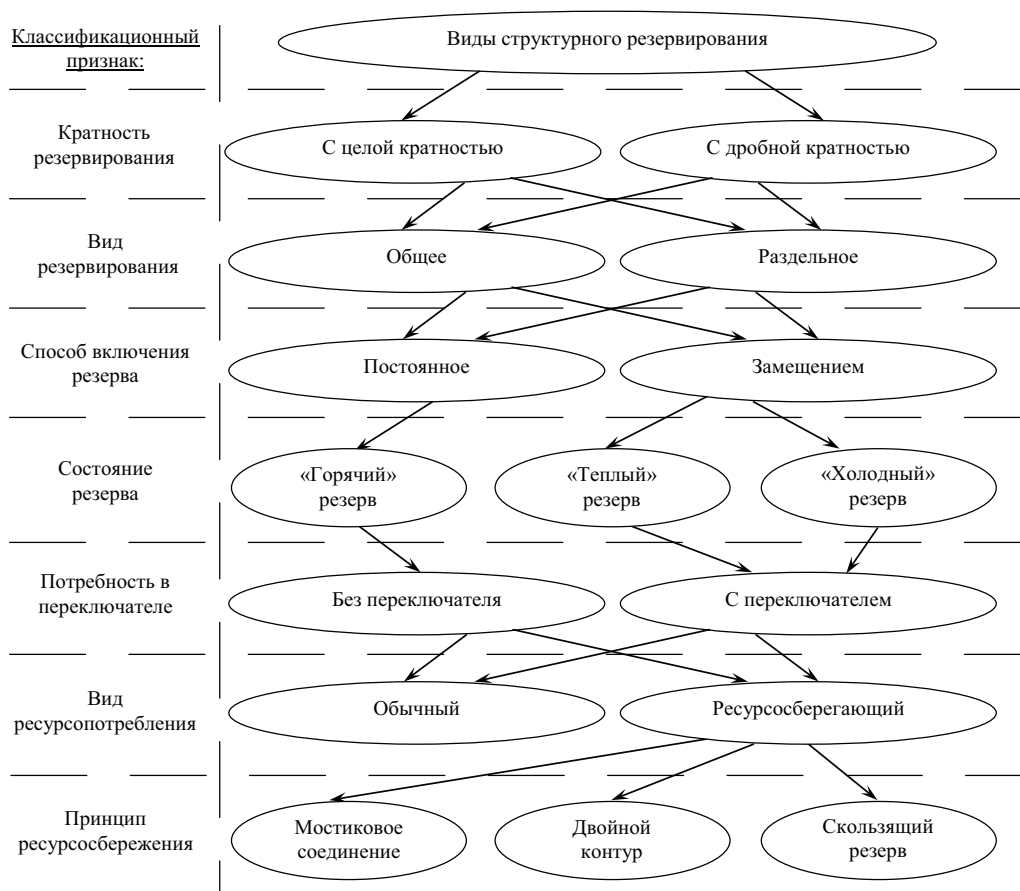


Рис. 1. Предлагаемая классификация способов структурного резервирования на автомобильном транспорте.

ученной при этом считается теория надежности технических систем. Ее методология и понятийный аппарат используются, впрочем, и при рассмотрении других объектов. Например, понятие «риск», а также методы прогнозирования и снижения вероятности рисков событий в технике стали предметом изучения риск-менеджмента и используются в ходе анализа надежности производственных и экономических процессов [2, 15, 17]. Принципы расчета надежности технических объектов адаптированы к условиям расчета надежности цепей поставок [4, 7, 12].

Надежность транспортных систем и процессов автомобильных перевозок тоже имеет методологическую связь с надежностью технических систем, поскольку для повышения качества доставки грузов и пассажиров, как и в технике, применяется резервирование. Помимо

этого, анализ надежности автомобильных перевозок опирается на методическую базу основ безопасности дорожного движения, технической эксплуатации автомобилей, ситуационного управления перевозками.

Вместе с тем следует принимать во внимание, что теория надежности транспортных систем и процессов еще не полностью сформирована. Поэтому актуальными остаются исследования, направленные на развитие ее методического, нормативно-правового и информационного обеспечения, и это напрямую отражается на характере изучения процессов в сфере автомобильного транспорта.

КЛАССИФИКАЦИЯ И СОЧЕТАНИЯ СПОСОБОВ

Предлагаемые в статье рекомендации базируются на определениях надежности



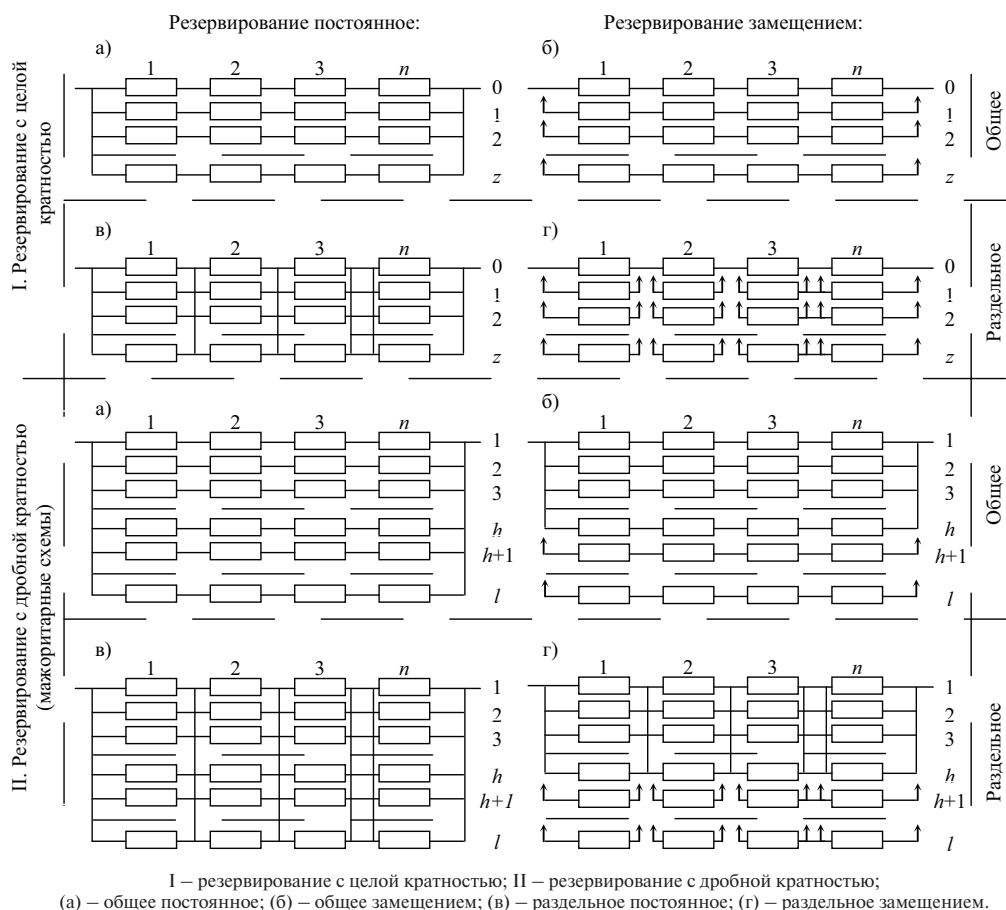


Рис. 2. Сочетания способов структурного резервирования.

и отказа перевозочного процесса, сформулированных в [6, 10]. В соответствии с ними надежность функционирования транспортных систем и процессов автомобильных перевозок — комплексное свойство, включающее способность системы выполнять согласованные между заказчиком и исполнителем транспортной услуги требования по количеству и состоянию перевозимого груза, безопасности пассажиров и сохранности их багажа, соблюдению графика транспортного процесса, а также поддержания и восстановления заданного уровня транспортного обслуживания. Невыполнение согласованных требований является отказом. Причинами отказов могут быть как недостатки у самого исполнителя транспортной технологической операции, так и сбой в работе других участников процесса.

Существует возможность повышения надежности транспортного процесса вве-

дением в его структуру дополнительных структурных элементов или их соединений. Вводимые элементы называются посредниками-дублерами, а соединения дублирующих структурных элементов — резервными каналами доставки. Принцип повышения надежности за счет использования резервных элементов реализуется при наличии любой современной аппаратуры. В работе [9] такой подход назван структурным резервированием.

В зависимости от кратности, вида, состояния и способа включения резерва, потребности в переключателе определены схемы общего и раздельного резервирования, постоянного резервирования и резервирования замещением, резервирование с целой и дробной кратностью. Авторами предлагается классификация способов структурного резервирования транспортных систем и процессов, учитывающая перечисленные признаки резер-

вирования технических систем и новые классификационные признаки: вид ресурсопотребления и принцип ресурсосбережения (рис. 1).

Повышение надежности транспортных систем и процессов автомобильных перевозок достигается либо резервированием основного канала доставки целиком, либо его отдельных элементов. Отсюда два вида структурного резервирования: общее и раздельное (поэлементное). По способу включения резервных каналов доставки резервирование как общее, так и раздельное может быть с постоянно включенным резервом и с замещением. При постоянно включенном резерве основной и все резервные каналы функционируют одновременно, начиная с момента выполнения первой технологической операции транспортного процесса. При включении резерва по способу замещения резервные каналы доставки начинают работать только после отказа основных каналов. Сочетания указанных способов приведены в виде схем на рис. 2.

Постоянно включенный резерв имеет название нагруженного или «горячего», а ненагруженное состояние характерно при резервировании замещением. Когда резервный канал доставки готов практически мгновенно заменить отказавший основной канал, следует считать, что он находится в «теплом» состоянии. Если требуется некоторое время на подготовку резервного канала к работе (необходимое на его «разогрев»), то такой резерв находится в «холодном» состоянии.

Для нормального функционирования схем, резервированных замещением, требуется наличие переключателя — устройства, которое в случае отказа обеспечивает включение в работу резервного канала доставки или его участка, находящегося в «теплом» или «холодном» состоянии. Одно из главных требований к переключателю — его быстрое действие, то есть время ввода резервных каналов доставки не должно существенно сказываться на ходе транспортного процесса. Следует также отметить, что низкая надежность переключателей, как и большое их количество, негативно влияют на общий результат перевозки. Схемы постоянного резервирования

транспортного процесса наличия переключателя не требуют.

Независимо от наличия или отсутствия переключателя, резервирование транспортного процесса предлагается также различать по виду ресурсопотребления. Включение данного классификационного признака определяется потребностью структурного элемента в трудозатратах, технике, энергоресурсах, материальных ценностях, нужных для выполнения технологических операций транспортного процесса. Как правило, величина таких затрат находится в прямой зависимости от числа структурных элементов. Схемы постоянного резервирования или с замещением являются схемами резервирования с обычным ресурсопотреблением. Схемы резервирования, обеспечивающие такой же или близкий к нему уровень надежности меньшим количеством элементов, квалифицируются как ресурсосберегающие.

Выигрыш надежности, приведенный на один структурный элемент, в ресурсосберегающих схемах выше. Это достигается особой их конфигурацией или спецификой соединений, которые имеют место в схемах резервирования — мостиковых, с двойным контуром, скользящим резервом. Сочетание способов резервирования и потребность в специальном математическом аппарате оценки надежности определяют методы структурного резервирования на автомобильном транспорте: постоянное резервирование с целой кратностью, резервирование замещением, мажоритарные и ресурсосберегающие схемы.

ПОСТОЯННОЕ С ЦЕЛОЙ КРАТНОСТЬЮ

Схемы (а, в) на рис. 2 иллюстрируют тип постоянного резервирования с целой кратностью. В них основной и резервные каналы доставки функционируют одновременно с момента начала перевозки. Такое резервирование характеризуется булевой функцией:

$$\varphi(x) = \bigcup_{i=1}^{z+1} x_i = x_1 \cup x_2 \cup \dots \cup x_{z+1}, \quad (1)$$

где $\varphi(x)$ — структурная функция транспортного процесса:





$$\phi(x) = \begin{cases} 1 & \text{— если отказа транспортного процесса в целом не наблюдается;} \\ 0 & \text{— если наблюдается отказ транспортного процесса.} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $x = (x_1, x_2, \dots, x_{z+1})$ — вектор состояний i -го канала доставки.

Для случайной булевой переменной, то есть бернуллиевой случайной величины структурная функция надежности транспортного процесса примет вид:

$$E\{\phi(x)\} = P, \quad (3)$$

где P — критерий надежности транспортного процесса.

Основываясь на приведенных выражениях, критерий надежности транспортного процесса с применением общего постоянного резервирования с целой кратностью будет рассчитываться по формуле

$$P = E\{\phi(x)\} = 1 - \prod_{i=1}^{z+1} Q_i = 1 - \prod_{i=1}^{z+1} (1 - P_i), \quad (4)$$

где Q_i — критерий отказа транспортного процесса;

P_i — критерий надежности i -го канала доставки, включая основной.

Тот же критерий при раздельном постоянном резервировании с целой кратностью определяется двумя вариантами — последовательно-параллельной структуры:

$$P = 1 - \prod_{j=1}^{z+1} \left(1 - \prod_{i=1}^n p_{ij} \right); \quad (5)$$

— параллельно-последовательной структуры:

$$P = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^{z+1} (1 - p_{ij}) \right), \quad (6)$$

где p_{ij} — критерий надежности структурного элемента транспортного процесса.

С постоянно включенным резервом транспортный процесс отказывает в случае отказа всех каналов доставки. Поэтому данный вид структурного резервирования обладает следующими свойствами:

— с увеличением числа резервных каналов надежность транспортного процесса при прочих равных условиях повышается;

— надежность транспортного процесса в целом всегда выше, чем надежность любого канала доставки, в том числе и наилучшего.

На практике постоянное резервирование с целой кратностью для повышения надежности транспортного процесса применяется относительно редко, поскольку не всегда удастся организовать параллельную работу участников в режиме нагруженного резерва, особенно в случае поэтапного резервирования. Кроме того, такое резервирование отличается высокой себестоимостью.

МАЖОРИТАРНЫЕ СХЕМЫ

Расчет надежности мажоритарных схем (схем резервирования с дробной кратностью) имеет свою специфику, поскольку для безотказного функционирования транспортного процесса нужна безотказная работа не менее (h) каналов доставки из (l) возможных, включая основные и резервные. Булева функция, характеризующая такое резервирование, принимает значения:

$$\phi(x) \in \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^l x_i \geq h \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^l x_i < h. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь подразумевается, что безотказная работа i -го канала доставки (его состояние (x_i)) и наличие отказа канала доставки являются событиями попарно несовместными. Они исключают друг друга. Например, в случае обязательной работы двух каналов доставки из трех возможных функция $\phi(x)$ примет вид:

$$\phi(x) = (x_1 \cap x_2 \cap x_3) \cup (\bar{x}_1 \cap x_2 \cap x_3) \cup (x_1 \cap \bar{x}_2 \cap x_3) \cup (x_1 \cap x_2 \cap \bar{x}_3). \quad (8)$$

Переход от булевой функции к формуле для расчета критерия надежности транспортного процесса производится посредством биномиального распределения. Для рассмотренной мажоритарной схемы «два канала доставки из трех» формула расчета величины (P) получается путем преобразования выражения вероятности всех возможных его состояний, то есть с помощью разложения бинома:

$$\begin{aligned} (P+Q)^3 &= P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 + P_1 \cdot P_2 \cdot Q_3 + \\ &+ P_1 \cdot Q_2 \cdot P_3 + Q_1 \cdot P_2 \cdot P_3 + \\ &+ P_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 + Q_1 \cdot P_2 \cdot Q_3 + \\ &+ Q_1 \cdot Q_2 \cdot P_3 + Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = I. \end{aligned} \quad (9)$$

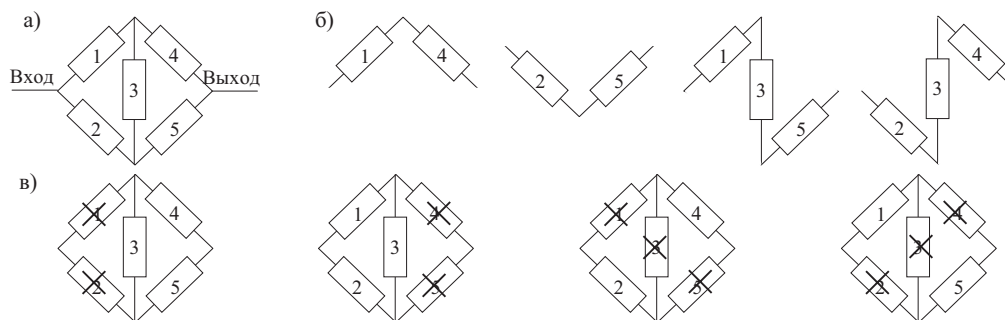


Рис. 3. Блок-схема (а), минимальные пути (б) мостикового соединения.

Для мажоритарных схем резервирования, насчитывающих $(l - h)$ резервных каналов доставки, а также $(l - h)$ резервных элементов любого из $(h + n)$ структурных элементов основных каналов биномиальное выражение возможных состояний транспортного процесса будет записано формулой (10). Для упрощения записи принято допущение о равнонадежности всех структурных элементов каналов доставки:

$$(P + Q)^l = P^l + l \cdot P^{l-1} \cdot Q + \frac{l \cdot (l-1)}{2!} \cdot P^{l-2} \cdot Q^2 + \frac{l \cdot (l-1) \cdot (l-2)}{3!} \cdot P^{l-3} \cdot Q^3 + \frac{l \cdot (l-1) \cdot (l-2) \cdot (l-3)}{4!} \cdot P^{l-4} \cdot Q^4 + \dots + Q^l = l. \quad (10)$$

Мажоритарные схемы резервирования на практике используются довольно часто, поскольку обеспечивают требуемый уровень надежности числом резервных каналов доставки меньшим, чем число каналов, требуемых заказчиком.

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЗАМЕЩЕНИЕМ

Принцип расчета надежности транспортного процесса при использовании резервирования замещением основан на формуле полной вероятности. В качестве примера взята схема с одним основным (А) и одним резервным каналами доставки (Б). С учетом равнонадежности каналов доставки отказы в транспортном процессе будут наблюдаться при следующих гипотезах: отказа канала (А) в течение времени (t) не наблюдалось; отказ канала (А) произошел в момент времени (τ) , а канал (Б), будучи исправным до момента замещения (τ) ,

работал безотказно в течение времени $(t - \tau)$.

На основании формулы полной вероятности рассматриваемых гипотез критерий надежности транспортного процесса, резервированного замещением в течение времени (t) , будет равен:

$$P(t) = P_A(t) + P_{Б/А}(t, \tau) \cdot Q_A(t), \quad (11)$$

где $P_A(t)$ — вероятность безотказной работы основного канала доставки в течение времени (t) ; $P_{Б/А}(t, \tau)$ — вероятность безотказной работы резервного канала доставки в течение времени (t) при условии, что отказ основного канала произошел в момент времени (τ) ; $Q_A(t)$ — вероятность отказа основного канала доставки в течение времени (t) .

Для определения величины $P_A(t)$ применим принцип расчета вероятности безотказной работы технических объектов, основанный на испытании однотипных образцов:

$$P_A(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (12)$$

где N_0 — количество образцов в начале испытания, шт.; $n(t)$ — количество образцов, вышедших из строя за рассматриваемый интервал времени, шт.

Расчет величины $P_A(t)$ предлагается основывать на принципе определения критерия надежности транспортного процесса [8]. Если принять за количество образцов в начале испытания (N_0) общее число заявок на транспортный процесс, принятых к исполнению за рассматриваемый период, а количество образцов, вышедших из строя $n(t)$ — за разность общего количества заявок, принятых к исполнению, и числа выполненных исполнителем





$$\begin{aligned}
 P_{B/A}(t, \tau) &= \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} \left(\frac{(M - \sum_{j=1}^M F_j) \cdot \Delta \tau_i}{M \cdot \Delta \tau_i} \cdot \frac{\sum_{j=1}^M F_j}{M} \right) = \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} \left(\frac{M \cdot \sum_{j=1}^M F_j - \sum_{j=1}^M F_j^2}{M^2} \right) = \\
 &= \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} \left(\frac{\sum_{j=1}^M F_j}{M} - \frac{\sum_{j=1}^M F_j^2}{M^2} \right) = \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} [P_B(t, t_i) - P_B^2(t, t_i)] = \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} [P_B(t, t_i) \cdot (1 - P_B(t, t_i))] = \\
 &= \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} [P_B(t, t_i) \cdot Q_B(t, t_i)],
 \end{aligned} \tag{16}$$

заявок за этот же период времени без нарушений требований заказчика, формула (12) примет вид:

$$P_A(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{M - \left(M - \sum_{j=1}^M F_j \right)}{M} = \frac{\sum_{j=1}^M F_j}{M}, \tag{13}$$

где M — общее число заявок на транспортный процесс, принятых к исполнению за рассматриваемый период, ед.; $\sum_{j=1}^M F_j$ —

число выполненных исполнителем заявок за этот же период времени без нарушений требований заказчика, ед.

Для определения величины $P_{B/A}(t, \tau)$ в транспортном процессе также предлагается воспользоваться математическим аппаратом теории надежности технических систем:

$$P_{B/A}(t, \tau) = \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} a(t_i) \cdot \Delta \tau_i \cdot P_B(t, t_i), \tag{14}$$

где $a(t_i)$ — частота отказов системы или процесса, $ч^{-1}$; $\Delta \tau_i$ — интервал времени, $ч$; $P(t, t_i)$ — критерий надежности и отказа одного резервного канала в течение времени $(t - t_i)$.

Основываясь на преобразованиях формулы (13), получаем выражение для нахождения $a(t)$ транспортного процесса, эквивалентное выражению для определения $a(t)$ технического объекта:

$$a(t_i) = \frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta \tau_i} = \frac{M - \sum_{j=1}^M F_j}{M \cdot \Delta \tau_i}. \tag{15}$$

Тогда искомая формула (16).

Следует отметить, что схема резервирования транспортного процесса замещением имеет одно важное ограничение — переключающее устройство в смысле надежности идеально. На практике любое резервное соединение, работающее по принципу замещения, требует применения переключающих устройств в каждой рабочей и резервной цепи. В транспортном процессе функцию переключателя выполняет диспетчер, осуществляющий в оперативном режиме мониторинг, вырабатывающий и реализующий управляющие воздействия для предотвращения отказов или их устранения с минимальными последствиями. В смысле надежности переключатели имеют последовательное соединение с резервируемыми каналами доставки, поэтому формула для расчета критерия надежности транспортного процесса, резервированного замещением, корректируется следующим образом:

$$P(t) = P_{t-h}(t) + P_? \cdot \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta \tau_i}} [P(t, t_i) \cdot Q(t, t_i)] \cdot Q_{t-h}(t), \tag{17}$$

где $P_?$ — вероятность безотказной работы переключателя.

Перечисленные методы структурного резервирования являются разновидностью методов повышения надежности с обычным ресурсопотреблением. Далее приводятся ресурсосберегающие методы.

МОСТИКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Подобное соединение (рис. 3) невозможно редуцировать до более простых эквивалентных схем посредством сворачивания последовательных и параллельных цепочек структурных элементов.

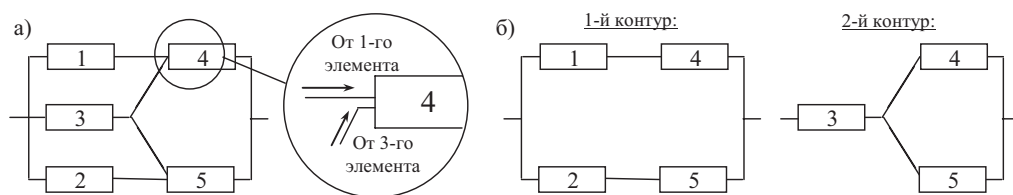


Рис. 4. Схема резервирования транспортного процесса с двойным контуром.

Представленная на рис. 3а схема будет работоспособна, когда действует хотя бы один минимальный путь от входа до выхода. Полный набор минимальных путей приведен на рис. 3б. В него входят подмножества элементов $\{x_1; x_4\}$, $\{x_2; x_5\}$, $\{x_1; x_3; x_5\}$, $\{x_2; x_3; x_4\}$. Структурная функция мостикового соединения, выраженная через минимальные пути, запишется в виде:

$$\varphi(x_1, \dots, x_5) = (x_1 \cap x_4) \cup (x_2 \cap x_5) \cup (x_1 \cap x_3 \cap x_5) \cup (x_2 \cap x_3 \cap x_4). \quad (18)$$

Критерий надежности транспортного процесса, структурные элементы которого имеют мостиковое соединение, отражает вероятность того, что булева функция (18) равна единице. Для вычисления этого выражения предлагается применить метод декомпозиции булевых функций [16]. Суть его заключается в разложении булевой функции относительно какого-либо элемента, что дает возможность трансформации неприводимой схемы в параллельно-последовательную или последовательно-параллельную.

Выбор (фиксация) структурного элемента для дальнейшей декомпозиции функции $\varphi(x_i)$ не имеет значения, поскольку величина критерия надежности транспортного процесса не зависит от полученной конфигурации схемы, даже если не принимать ограничение относи-

тельно равнонадежности элементов. Поэтому формула для расчета надежности мостикового соединения в транспортном процессе имеет вид (19), где $p_{1, \dots, 5}$, $q_{1, \dots, 5}$ — соответственно критерии надежности и отказа 1-го, ..., 5-го структурного элемента транспортного процесса.

Использование мостиковых соединений для резервирования транспортного процесса при сопоставимом уровне надежности позволяет вдвое снизить потребность в структурных элементах по сравнению со схемами резервирования обычного ресурсопотребления.

СХЕМЫ С ДВОЙНЫМ КОНТУРОМ

Транспортный процесс может включать элементы, насчитывающие не один, а два «входа» (рис. 4).

В представленной схеме резервирования исключается работа каналов 1—5 и 2—4. Вследствие этого связь элементов (1) и (2) с элементом (3) невозможна. По сути, в рамках схемы действуют два независимых контура (рис. 4, б). Методика расчета надежности такого соединения основана на использовании теоремы Байеса: если (А) событие, зависящее от одного из двух несовместимых событий (B_i) и (B_j), из которых хотя бы одно обязательно происходит, то вероятность появления события (А) равна: $P(A) = P(A, \text{при условии } B_i) \times P(B_i) + P(A, \text{при условии } B_j)$.

$$\begin{aligned} P &= p_1 \cdot [1 - [1 - (1 - q_2 \cdot q_3) \cdot p_5] \cdot q_4] + q_1 \cdot p_2 \cdot [1 - (1 - p_3 \cdot p_4) \cdot q_5] = \\ &= p_2 \cdot [1 - [1 - (1 - q_1 \cdot q_3) \cdot p_4] \cdot q_5] + q_2 \cdot p_1 \cdot [1 - (1 - p_3 \cdot p_5) \cdot q_4] = \\ &= p_3 \cdot (1 - q_1 \cdot q_2) \cdot (1 - q_4 \cdot q_5) + q_3 \cdot [1 - (1 - p_1 \cdot p_4) \cdot (1 - p_2 \cdot p_5)] = \\ &= p_4 \cdot [1 - [1 - (1 - q_3 \cdot q_5) \cdot p_2] \cdot q_1] + q_4 \cdot p_5 \cdot [1 - (1 - p_1 \cdot p_3) \cdot q_2] = \\ &= p_5 \cdot [1 - [1 - (1 - q_3 \cdot q_4) \cdot p_1] \cdot q_2] + q_5 \cdot p_4 \cdot [1 - (1 - p_2 \cdot p_3) \cdot q_1]. \end{aligned} \quad (19)$$



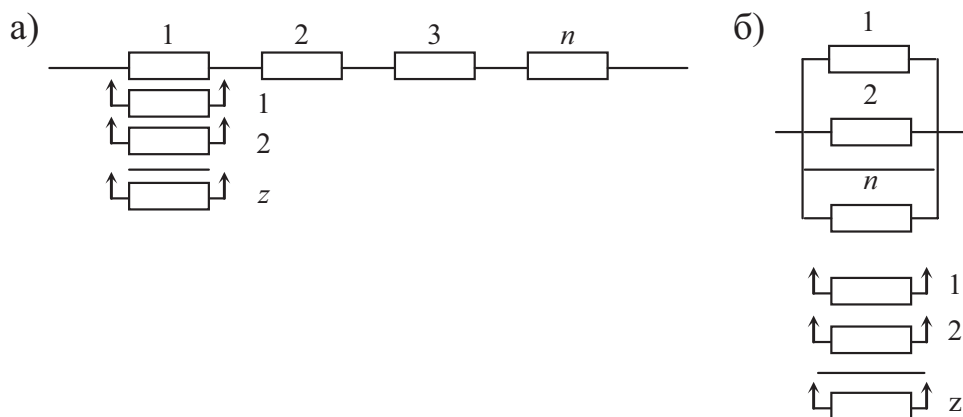


Рис. 5. Схема резервирования транспортного процесса со скользящим резервом при последовательном (а) и параллельном (б) соединении элементов основного канала доставки.

Обозначим событие (А) как отказ транспортного процесса, а события (B_i) и (B_j) через отказы – соответственно как безотказную работу и отказ структурного элемента (х), от которого зависит надежность транспортного процесса. Тогда формулировка теоремы Байеса в символьном выражении будет следующей:

$$P(\text{отказ процесса}) = P(\text{отказ процесса, при исправном (х)}) \times P(\text{х исправен}) + P(\text{отказ процесса, при неисправном (х)}) \times P(\text{х неисправен}). \quad (20)$$

Если за (х) принять 3-й структурный элемент (рис. 4а), то формула для расчета надежности транспортного процесса примет вид:

$$Q = (1 - P_4) \cdot (1 - P_5) \cdot P_3 + (1 - P_1 \cdot P_4) \cdot (1 - P_2 \cdot P_5) \cdot (1 - P_3). \quad (21)$$

Уточним: необходимость использования схем с двойным контуром для повышения надежности транспортного процесса определена спецификой технологии автомобильных перевозок, а также ограничениями правил дорожного движения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЗЕРВА

При таком резервировании любой из резервных элементов может замещать любой элемент основного канала доставки. После замещения резервный элемент

становится основным, а при отказе может быть замещен любым из оставшихся резервных элементов (рис. 5).

Данный метод повышения надежности транспортного процесса аналогичен принципу повышения надежности с использованием поэлементного резервирования замещением. Поэтому расчет критерия надежности транспортного процесса, в структуре которого используется скользящий резерв, производится по (13, 16, 17). Несмотря на то, что метод эффективен, его использование на практике ограничено следующими причинами:

- потребностью в высоконадежном переключателе, наличием «человеческого фактора»;
- реализация резервирования требует наличия однотипных элементов в основном канале доставки, что ввиду технологической специфики транспортного процесса сложно, а в ряде случаев невозможно.

ВЫВОДЫ

1. Все более подтверждают свою актуальность исследования, направленные на развитие методического, нормативно-правового и информационного обеспечения надежности транспортных систем и процессов, в том числе за счет структурного резервирования.

2. Введение в транспортный процесс дополнительных структурных элементов или их соединений повышает его надеж-

ность. Такие элементы становятся посредниками-дублерами, а соединения дублирующих структурных элементов – резервными каналами доставки.

3. Предложенная классификация способов структурного резервирования транспортного процесса учитывает признаки резервирования технических систем (кратность, вид, состояние и способ включения резерва, потребность в переключателе) и новые классификационные признаки (вид ресурсопотребления и принцип ресурсосбережения). Сочетание способов и потребность в специальном математическом аппарате оценки надежности определяют методы структурного резервирования в сфере автотранспорта, предлагаемые в работе: постоянного резервирования с целой кратностью, использование резерва замещением, мажоритарных и ресурсосберегающих схем.

4. Математический аппарат метода постоянного резервирования с целой кратностью наиболее приспособлен к инженерным расчетам, он обеспечивает поэтапное упрощение параллельно-последовательных и последовательно-параллельных соединений элементов, а возможность использования формул бинарной логики значительно упрощает вычисления. Однако реализация метода связана с большими затратами на содержание резервов.

5. Мажоритарные схемы резервирования позволяют на один резервируемый элемент использовать меньшее число резервных элементов, чем в схемах постоянного резервирования с целой кратностью. Методика расчета надежности мажоритарных схем основывается на определении структурной функции транспортного процесса в булевых переменных и ее последующем преобразовании в формулу надежности с помощью биномиального распределения.

6. Методика расчета надежности схем резервирования замещением базируется на формуле полной вероятности гипотез о безотказной работе и об отказах резервируемых и резервных каналов доставки. Она учитывает обязательное наличие переключателя в схеме, имеющего последовательное соединение с резервируемым каналом.

7. Принципиальным отличием ресурсосберегающих схем с использованием мостикового соединения, двойного контура или скользящего резерва является отсутствие в них параллельно-последовательных и последовательно-параллельных соединений элементов. Этим достигается выигрыш надежности на один структурный элемент транспортного процесса и как следствие – экономия производственных ресурсов на обеспечение надежной работы сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базовский И. Надежность: теория и практика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 373 с.
2. Балабанов И. Т. Риск-менеджмент. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 192 с.
3. Берг А. И. Кибернетика и надежность. – М.: Наука, 1964. – 96 с.
4. Бочкарев А. А., Бочкарев П. А. Проблема надежности цепи поставок // Логистика: современные тенденции развития: Материалы IX междунар. науч. – практ. конф. / Ред. кол.: В. С. Лукинский и др. – СПб.: СПбГИЭУ, 2010. – С. 64–67.
5. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 275 с.
6. Грязнов М. В. Подходы к надежности транспортных систем // Мир транспорта. – 2010. – № 2. – С. 14–19.
7. Зайцев Е. И. Проблема надежности в процессной модели цепи поставок // Логистика и управление цепями поставок: современные тенденции в России и Германии: Сб. статей рос.-нем. конференции DR-LOG 2008. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 266–271.
8. Курганов В. М., Грязнов М. В. Параметры надежности транспортных систем // Бюллетень транспортной информации. – 2010. – № 11. – С. 34–36.
9. Курганов В. М., Грязнов М. В. Управление надежностью транспортных систем и процессов автомобильных перевозок: Монография. – Магнитогорск: Дом печати, 2013. – 318 с.
10. Курганов В. М., Грязнов М. В., Обеспечение надежности в системе управления перевозками и производством на автомобильном транспорте: Монография. – Магнитогорск: Дом печати, 2012. – 128 с.
11. Нейман Дж. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент: Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1956.
12. Некрасов А. Г., Миротин Л. Б., Меланич Е. В. Управление цепями поставок в транспортном комплексе. – М.: Гор. линия – Телеком, 2012. – 262 с.
13. Половко А. М. Основы теории надежности. – М.: Наука, 1964. – 448 с.
14. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем: Пер. с нем. – М.: Мир, 1979. – 452 с.
15. Уткин Э. А., Фролов Д. А. Управление рисками предприятия. – М.: ТЕИС, 2003. – 248 с.
16. Ушаков И. А. Курс теории надежности систем: Учеб. пособие. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
17. Черкасов В. В. Проблемы риска в управленческой деятельности. – М.: Рефл-бук; Киев: Ваклер, 1999. – 287 с.

