УДК 519.171.4

DOI: 10.15827/0236-235X.119.510-516

Дата подачи статьи: 13.02.17

2017. Т. 30. № 3. С. 510–516

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУППИРОВКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*С.В. Игнатьев, д.т.н., профессор;**В.Б. Тихонов, к.т.н., доцент;**А.В. Красников, к.т.н., ст. преподаватель;**А.А. Осипов, адъюнкт, alexalexosipov@mail.ru**(Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Московский просп., 28, г. Ярославль, 150001, Россия)*

Поддержание надежности сложных радиоэлектронных средств на заданном уровне в первую очередь зависит от эффективности функционирования существующей системы технической эксплуатации, одной из составных частей которой является система материально-технического обеспечения.

Основной задачей данной системы является своевременное пополнение запасов материально-технических ресурсов, необходимых для правильной эксплуатации радиоэлектронных средств. При этом в связи со значительным пространственным разнесением комплексов специального назначения, основу которых составляют радиоэлектронные средства, от баз хранения и ремонта становится актуальной задача быстрого и правильного принятия решения при управлении доставкой необходимых ресурсов. Для этого требуется знать возможные (предпочтительные) маршруты доставки материально-технических ресурсов с учетом различных аварийных ситуаций, дорожных заторов, масштабных дорожных работ, природных катаклизмов и других факторов, а также оптимальные из них по критерию требуемого значения времени и (или) стоимости доставки материально-технических ресурсов.

В работе предложена пространственно-временная модель транспортной сети системы материально-технического обеспечения эксплуатации группировки радиоэлектронных средств, на основе которой может быть решена задача определения предпочтительных маршрутов доставки материально-технических ресурсов до потребителя и выбора из них оптимального маршрута по заданным критериям.

Ключевые слова: *система материально-технического обеспечения, радиоэлектронные средства, материально-технические ресурсы, пространственно-временная модель, транспортная сеть, граф.*

Основу системы технической эксплуатации составляют подсистемы технического обслуживания, диагностирования и *материально-технического обеспечения* (МТО). Функционирование первых двух систем направлено на увеличение времени наработки *радиоэлектронных средств* (РЭС) на отказ T_0 и уменьшение времени их восстановления T_v соответственно. На сегодняшний день исследования ведутся по каждой системе, причем в разных направлениях. При этом все больше внимания уделяется экспертным системам или системам поддержки принятия решения обслуживающим персоналом в процессе технической эксплуатации сложных РЭС. Известны определенные результаты данных исследований в области технического диагностирования и обслуживания [1–4]. Однако они получены при определенных ограничениях, одним из которых является допущение того, что РЭС полностью укомплектованы требуемыми *материально-техническими ресурсами* (МТР) и последние не оказывают никакого влияния на T_0 и T_v . Такая ситуация не в полной мере соответствует действительности, что приводит к необходимости более глубокого исследования *системы материально-технического обеспечения* (СМТО).

Под СМТО эксплуатации понимается совокупность материальных, транспортных, информационных и других компонентов, служащих для функционирования технической системы с заданной эф-

фективностью. Одной из основных задач МТО является своевременная доставка до потребителя МТР [5]. Ее решение характеризуется временем доставки t_d (составляющая T_v) и определяется как

$$t_d = t_{\text{си}} + t_{\text{фс}} + t_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{си}}$ – время сбора информации о наличии МТР в подразделениях СМТО; $t_{\text{фс}}$ – время формирования схемы транспортировки МТР; $t_{\text{тр}}$ – время транспортировки МТР.

Опыт эксплуатации показывает, что среди составляющих времени t_d наиболее высокие значения имеет время транспортировки, которое зависит от ряда факторов. Прежде всего это взаимное расположение на местности пунктов отправки и пунктов приема МТР, что определяет пространственную топологию транспортной сети (так называемый пространственный параметр), и время транспортировки, которое определяется расстоянием s между пунктами доставки и средней скоростью движения v , которая, в свою очередь, зависит от типа транспортного средства, доставляющего груз. Последние две величины определяют временной параметр транспортной сети.

Анализ существующей СМТО РЭС показывает, что на сегодняшний день задача выбора оптимального маршрута (схемы перевозки) МТР с точки зрения минимума $t_{\text{тр}}$ решается не в полной мере [6]. Для комплексного учета всех возможных ситуаций и принятия правильного решения по обеспечению

требуемыми ресурсами потребителя необходимо построить модель транспортной сети СМТО, которую назовем пространственно-временной моделью. Для этого решим задачу формализации, то есть осуществим переход от концептуальной модели (разнотипных элементов системы, описанных в терминах предметной области) к ее математическому описанию (формальным однотипным). Очевидно, что наиболее просто это осуществить, используя теорию графов [7–9].

Рассмотрим абстрактный пример. Пусть имеется некая транспортная сеть (рис. 1).

На первом этапе представим узловые пункты транспортной сети (населенные пункты, пункты перегрузки груза и смены транспорта, развилки дорог и т.д.) вершинами (узлами) графа, а пути сообщения между этими пунктами (наземные, воздушные, водные) – его ребрами. В рассматриваемом примере (см. рис. 1) эти пути выделены черными ломаными линиями. Поскольку один и тот же узел в различных случаях может быть как источником ресурса, так и его потребителем, транспортную сеть будем представлять неориентированным графом. Кроме того, исходя из логики функционирования транспортной сети, характерной особенностью данного графа является отсутствие петель (узел не может сам себе доставлять необходимый ресурс).

В итоге получим мультиграф транспортной сети (рис. 2) $G_n = \langle U, R \rangle$, где $U = \{u_i / i = 1, 2, \dots, 5\}$ – множество вершин графа; $R = \{r_k / k = 1, 2, \dots, 8\}$ – множество ребер графа. В общем случае $G_n = \langle U, R \rangle$, где $U = \{u_i / i = 1, 2, \dots, I\}$, I – количество вершин графа; $R = \{r_k / k = 1, 2, \dots, K\}$, K – количество ребер графа.

Каждый узел транспортной сети (вершина графа) характеризуется набором определенных действий (например, дозаправка транспортного средства, оформление необходимых документов, перегрузка материальных ресурсов из одного транспортного средства в другое и т.д.), которые необходимо выполнить, чтобы продолжить движение. Все операции, проводимые в узлах транспорт-

Рис. 2. Неориентированный мультиграф транспортной сети

Fig. 2. A traffic network nonoriented multigraph

ной сети, имеют определенную стоимость и занимают некоторое время. Поэтому каждую вершину графа нагрузим кортежем

$$e_i = [t_i, c_i], \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots$; t_i – время выполнения определенных операций (время задержки) в i -м узле; c_i – стоимость выполнения этих операций в i -м узле транспортной сети.

Каждый участок пути транспортной сети (ребро графа) также характеризуется рядом параметров. С точки зрения времени транспортировки МТР выделим протяженность s_k k -го участка пути (r_k ребра графа) и качество покрытия k -го участка, определяющее скорость движения транспортного средства на данном участке (здесь имеется в виду, что в зависимости от качества дороги средняя скорость изменяется). Кроме того, сами транспортные сред-

ства имеют различную среднюю скорость движения $v(\theta_n)$, где θ_n – n -й тип транспортного средства, $\theta_n \in \Theta$, $\Theta = \{\theta_n / n = 1, 2, \dots, N\}$ – множество типов транспортного средства; N – количество типов транспортных средств транспортной сети, поэтому t_{tr} также будет различным. Исходя из вышесказанного, для моделирования транспортной сети воспользуемся формализованным представлением транспортных средств (рис. 3), то есть будем использовать общий параметр – среднюю скорость транспортировки определенным типом транспорта θ_n МТР по k -му участку пути – $v_k(\theta_n)$. В предложенной классификации транспортных средств (см. рис. 3) $N = 19$.

Различие видов и типов транспортных средств определяет и различие в стоимости транспортировки необходимых потребителю ресурсов по k -му

участку пути. Данный параметр обозначим как $c_k(\theta_n)$.

Также необходимо учитывать время года, время суток, климатические условия (дождь, туман, гололед и т.д.), в которых осуществляется транспортировка МТР, поскольку данные факторы могут приводить к изменению скорости движения транспортного средства. Их влияние учтем коэффициентом скорости g_k . Его значение может формироваться на основании нормативных документов (правил дорожного движения, руководств по эксплуатации транспортных средств, различных ведомственных правовых документов по безопасности движения и т.д.) и статистических данных по влиянию погоды на скорость потока транспорта.

В результате имеем совокупность параметров (кортеж), характеризующих k -й участок пути: $[r_k, s_k, \theta_n, v_k(\theta_n), g_k, c_k(\theta_n)]$. Данный кортеж интерпретируется следующим образом: по k -му участку пути протяженностью s_k движется транспортное средство θ_n со скоростью $v_k(\theta_n)$. Коэффициент скорости на k -м участке – g_k . Стоимость транспортировки МТР по k -му участку пути транспортным средством θ_n составляет $c_k(\theta_n)$. Такая характеристика участка пути преобразует его в участок маршрута транспортного средства θ_n . Очевидно, что при наличии нескольких типов транспортных средств получим на одном и том же участке пути несколько участков маршрутов, образованных этими транспортными средствами.

Представим данный кортеж в виде веса k -го ребра графа G_n (см. рис. 2): $p = [r_k, s_k, \theta_n, v_k(\theta_n), g_k, c_k(\theta_n)]$. Совокупность различных весов, характеризующих ребра графа, образует множество весов $P = \{p_l / l = 1, 2, \dots, L\}$, где L – количество весов ребер. При наличии нескольких типов транспортных средств, доставляющих ресурсы по одному и тому же участку пути (ребру), например θ_n и θ_m , где $\theta_n, \theta_m \in \Theta$ (см. рис. 3), получим дизъюнкцию различных весов ребра графа, например $(p_l \vee p_{l+1})$, где $p_l = [r_k, s_k, \theta_n, v_k(\theta_n), g_k, c_k(\theta_n)]$ и $p_{l+1} = [r_k, s_k, \theta_m, v_k(\theta_m), g_k, c_k(\theta_m)]$, $p_l, p_{l+1} \in P$. То есть с учетом вышеизложенного на k -м участке пути имеем два участка маршрута транспортных средств – θ_n и θ_m . Исходя из этого, в общем случае индекс веса ребра графа не будет совпадать с индексом ребра.

Таким образом, нагрузка вершин и ребер графа G_n преобразует существующие пути транспортной сети в маршруты транспортировки МТР. Другими словами, маршрут – это нагруженный путь, а нагруженный граф G_n – это граф G_m маршрутов транспортировки МТР.

При переходе от графа G_n к графу G_m необходимо учесть следующее. Поскольку граф путей транспортной сети неориентированный и перевозка материальных средств в различных условиях обстановки возможна как в прямом, так и в обратном направлениях, вес ребра для обоих направлений будет одинаковым.

Абстрагируемся от реальных условий и в произвольном порядке нагрузим граф G_n (рис. 2) рассматриваемой транспортной сети (рис. 1). В результате получим граф маршрутов G_m (рис. 4).

Рис. 4. Граф маршрутов транспортной сети

Fig. 4. A traffic network path graph

В общем виде граф маршрутов транспортной сети опишется выражением

$$G_m = \langle (U, E); (R, P) \rangle,$$

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_l\}, E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_l\},$$

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_k\}, P = \{p_1, p_2, \dots, p_l, \dots, p_l\}, \quad (3)$$

$$e_i = [t_i, c_i], p_l = [r_k, s_k, \theta_n, v_k(\theta_n), g_k, c_k(\theta_n)],$$

$$\theta_n \in \Theta, n = 1, 2, \dots, N.$$

Веса вершин и ребер графа (см. рис. 4) могут выступать в качестве их идентификаторов. Поэтому граф маршрутов опишем матрицей смежности взвешенного графа (весовой матрицей смежности) $S(G_m) = [s_{ij}]_{l \times l}$ вида

$$s_{ij} = \begin{cases} p_l, & \text{если ребро } r_k \in R, \\ 0, & \text{если ребро } r_k \notin R. \end{cases} \quad (4)$$

В результате весовая матрица смежности $S(G_m)$ для рассматриваемого графа G_m будет иметь следующий вид:

$$S(G_m) = \begin{pmatrix} & p_2 & & p_1 & (p_7 \vee p_8 \vee p_9) \\ p_2 & & (p_3 \vee p_4 \vee p_6) & & \\ & (p_3 \vee p_4 \vee p_6) & & p_5 & p_{10} \\ p_1 & & & p_5 & p_{11} \\ (p_7 \vee p_8 \vee p_9) & & p_{10} & p_{11} & \end{pmatrix} \quad (5)$$

Пустые ячейки означают нулевые элементы матрицы. Отсутствие петель в графе G_m характеризует нулевая главная диагональ матрицы смежности $S(G_m)$. Все возможные маршруты между вершинами G_m могут быть получены с помощью матрицы достижимости [6]:

$$\begin{aligned} D(G_m) &= \sum_{n=1}^{d(G_m)} [S(G_m)]^n = \\ &= S(G_m) + S(G_m)^2 + \dots + S(G_m)^n + \dots \\ &+ S(G_m)^{d(G_m)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $d(G_m)$ – диаметр графа G_m .

Под диаметром графа G_m будем понимать максимальную длину простой цепи между вершинами u_i и u_j данного графа. В нашем случае $d(G_m) = 4$. Поскольку необходимо получить маршрут от i -й вершины к j -й в виде перечисления ребер, а для

$S(G_M)^2 =$				
		$e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 \vee$ $\vee e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 \vee$ $\vee e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3$	$e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{11} e_4$	$e_1 p_1 e_4 p_{11} e_5$
			$e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 \vee$ $\vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4$	$e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee$ $\vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_{10} e_5$
$=$	$e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 \vee$ $\vee e_3 p_5 e_4 p_1 e_1 \vee$ $\vee e_3 p_{10} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1$		$e_3 p_{10} e_5 p_{11} e_4$	$e_3 p_5 e_4 p_{11} e_5$
	$e_4 p_{11} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1$	$e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 \vee$ $\vee e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2$	$e_4 p_{11} e_5 p_{10} e_3$	$e_4 p_1 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee$ $\vee e_4 p_5 e_3 p_{10} e_5$
	$e_5 p_{11} e_4 p_1 e_1$	$e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 \vee$ $\vee e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2$	$e_5 p_{11} e_4 p_5 e_3$	$e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_1 e_4 \vee$ $\vee e_5 p_{10} e_3 p_5 e_4$

Рис. 5. Квадрат весовой матрицы смежности

Fig. 5. A weighing adjacency matrix square

нагруженного графа – весов ребер, возведение матрицы смежности $S(G_M) = [s_{ij}]$ в n -ю степень будем выполнять по известному правилу перемножения матриц, но при этом операцию умножения будем рассматривать как конкатенацию (приписывание справа к содержимому соответствующего элемента i -й строки содержимому соответствующего элемента j -го столбца), то есть стыковку соответствующих весов друг за другом, а операцию сложения полученных в результате умножения слов – как дизъюнкцию. Конкатенация с нулевым элементом даст в итоге нулевой элемент (отсутствие ребра означает обрыв пути). Суммирование матриц (6) также будем выполнять в соответствии с общеизвестным правилом, но по аналогии операцию сложения заменим операцией дизъюнкции. Тогда (6) запишется в виде

$$D(G_M) = \sum_{n=1}^{d(G_M)} [S(G_M)]^n = S(G_M) \vee S(G_M)^2 \vee \dots \vee S(G_M)^n \vee \dots \vee S(G_M)^{d(G_M)}. \quad (7)$$

Для рассматриваемого графа G_M

$$D(G_M) = \sum_{n=1}^4 [S(G_M)]^n = S(G_M) \vee S(G_M)^2 \vee S(G_M)^3 \vee S(G_M)^4. \quad (8)$$

Поскольку в транспортной сети СМТО исключены ситуации, когда промежуточные пункты для одного маршрута транспортировки повторяются, при формировании матрицы достижимости необходимо учитывать только простые маршруты, исключив циклы, то есть повторения вершин графа между начальным e_i и конечным e_j узлами маршрута: $e_i \neq \dots \neq e_q \neq \dots \neq e_j$.

В соответствии с (8), для примера найдем квадрат весовой матрицы смежности рассматриваемого графа $S(G_M)^2 = S(G_M) \cdot S(G_M)$, включив в конкатенацию веса вершин графа (см. рис. 5).

По аналогии, найдя третью $S(G_M)^3 = S(G_M)^2 \times S(G_M)$ и четвертую $S(G_M)^4 = S(G_M)^3 \times S(G_M)$ степени матрицы смежности графа G_M , получим матрицу достижимости $D(G_M)$:

$$D(G_M) = \begin{bmatrix} & m_{1,2} & m_{1,3} & m_{1,4} & m_{1,5} \\ m_{2,1} & & m_{2,3} & m_{2,4} & m_{2,5} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & & m_{3,4} & m_{3,5} \\ m_{4,1} & m_{4,2} & m_{4,3} & & m_{4,5} \\ m_{5,1} & m_{5,2} & m_{5,3} & m_{5,4} & \end{bmatrix} \quad (9)$$

Содержимое ячеек матрицы (9) представлено системой, которая полностью определяет систему маршрутов транспортной сети СМТО (см. рис. 6).

Таким образом, получена пространственно-временная модель $\mathbf{H}$ транспортной сети СМТО эксплуатации группировки РЭС, которая представляет собой совокупность графа (8) и матрицы достижимости (рис. 6): $H = \langle G_M, D(G_M) \rangle$. В общем виде модель запишется следующим образом:

$$G_M = \langle (U, E); (R, P) \rangle, \\ U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_I\}, E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_I\}, \\ R = \{r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_K\}, P = \{p_1, p_2, \dots, p_l, \dots, p_L\}, \\ e_i = [t_i, c_i], p_l = [r_k, s_k, \theta_n, v_k(\theta_n), g_k, c_k(\theta_n)], \\ \theta_n \in \Theta, n = 1, 2, \dots, N.$$

$$D(G_M) = \begin{cases} m_{i,j} = \bigvee_h (e_i p_{x_h} e_{a_h} \dots \vee \dots \vee e_{b_h} p_{y_h} e_j)_h; \\ h = 1, 2, \dots; \forall h: e_i \neq e_{a_h} \neq \dots \neq e_{b_h} \neq e_j; \\ e_i, e_{a_h}, e_{b_h}, e_j \in E; \\ p_{x_h}, p_{y_h} \in P; i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, I; i \neq j; \\ m_{i,j} = \bigvee_h (e_i p_{x_h} e_{a_h} \dots \vee \dots \vee e_{b_h} p_{y_h} e_j)_h; \\ h = 1, 2, \dots; \forall h: e_i \neq e_{a_h} \neq \dots \neq e_{b_h} \neq e_j; \\ e_i, e_{a_h}, e_{b_h}, e_j \in E; \\ p_{x_h}, p_{y_h} \in P; j = 1, 2, \dots, I; i = 1, 2, \dots, I; i \neq j. \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
D(G_m) = \{ & m_{1,2} = e_1 p_2 e_2 \vee e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee \\
& \vee e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{11} e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee e_1 p_1 e_4 p_{11} e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2; \\
& m_{1,3} = e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 \vee e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 \vee e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3 \vee \\
& \vee e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{11} e_4 p_5 e_3 \vee e_1 p_1 e_4 p_{11} e_5 p_{10} e_3; \\
& m_{1,4} = e_1 p_1 e_4 \vee e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{11} e_4 \vee e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4 \vee \\
& \vee e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3 p_5 e_4 \vee e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_{10} e_5 p_{11} e_4; \\
& m_{1,5} = e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee e_1 p_1 e_4 p_{11} e_5 \vee e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_{10} e_5 \vee \\
& \vee e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 p_{10} e_5 \vee e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4 p_{11} e_5; \\
& m_{2,3} = e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 \vee e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 \vee e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3 \vee \\
& \vee e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{11} e_4 p_5 e_3 \vee e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 p_{11} e_5 p_{10} e_3; \\
& m_{2,4} = e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4 \vee e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{11} e_4 \vee \\
& \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_{10} e_5 p_{11} e_4 \vee e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3 p_5 e_4; \\
& m_{2,5} = e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_{10} e_5 \vee e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 p_{11} e_5 \vee \\
& \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4 p_{11} e_5 \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4 p_1 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee \\
& \vee e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 p_{10} e_5; \\
& m_{3,4} = e_3 p_5 e_4 \vee e_3 p_{10} e_5 p_{11} e_4 \vee e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 \vee \\
& \vee e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{11} e_4; \\
& m_{3,5} = e_3 p_{10} e_5 \vee e_3 p_5 e_4 p_{11} e_5 \vee e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee \\
& \vee e_3 p_5 e_4 p_1 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 p_{11} e_5; \\
& m_{4,5} = e_4 p_{11} e_5 \vee e_4 p_1 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee e_4 p_5 e_3 p_{10} e_5 \vee e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 \vee \\
& \vee e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_{10} e_5; \\
& m_{2,1} = e_5 p_2 e_1 \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4 p_1 e_1 \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_{10} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 \vee \\
& \vee e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4 p_{11} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1; \\
& m_{3,1} = e_5 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 \vee e_5 p_5 e_4 p_1 e_1 \vee e_5 p_{10} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 \vee e_5 p_{10} e_5 p_{11} e_4 p_1 e_1 \vee \\
& \vee e_5 p_5 e_4 p_{11} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1; \\
& m_{3,2} = e_5 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee e_5 p_5 e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 \vee e_5 p_{10} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 \vee \\
& \vee e_5 p_{10} e_5 p_{11} e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 \vee e_5 p_5 e_4 p_{11} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2; \\
& m_{4,1} = e_4 p_1 e_1 \vee e_4 p_{11} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 \vee e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 \vee e_4 p_5 e_3 p_{10} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 \vee \\
& \vee e_4 p_{11} e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1; \\
& m_{4,2} = e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 \vee e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee e_4 p_{11} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 \vee \\
& \vee e_4 p_{11} e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee e_4 p_5 e_3 p_{10} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 \vee \\
& \vee e_4 p_1 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2; \\
& m_{4,3} = e_4 p_5 e_3 \vee e_4 p_{11} e_5 p_{10} e_3 \vee e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 \vee e_4 p_1 e_1 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_5 p_{10} e_3 \vee \\
& \vee e_4 p_{11} e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3; \\
& m_{5,1} = e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 \vee e_5 p_{11} e_4 p_1 e_1 \vee e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 \vee \\
& \vee e_5 p_{11} e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1; \\
& m_{5,2} = e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 \vee e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee e_5 p_{11} e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 \vee \\
& \vee e_5 p_{11} e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 \vee e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2; \\
& m_{5,3} = e_5 p_{10} e_3 \vee e_5 p_{11} e_4 p_5 e_3 \vee e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 \vee \\
& \vee e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_1 e_4 p_5 e_3 \vee e_5 p_{11} e_4 p_1 e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3; \\
& m_{5,4} = e_5 p_{11} e_4 \vee e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_1 e_4 \vee e_5 p_{10} e_3 p_5 e_4 \vee e_5 p_{10} e_3 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_2 p_2 e_1 p_1 e_4 \vee \\
& \vee e_5 (p_7 \vee p_8 \vee p_9) e_1 p_2 e_2 (p_3 \vee p_4 \vee p_6) e_3 p_5 e_4.
\end{aligned}$$

Рис. 6. Система маршрутов транспортной сети СМТО

Fig. 6. A transport network route system for a logistic system

Данная модель является основой разработанного программного продукта [10], обеспечивающего выбор оптимального маршрута транспортировки МТР в СМТО эксплуатации группировки РЭС.

Литература

1. Игнатьев С.В., Зосиев В.В., Черняк А.В., Малышев А.В. Функциональная структура системы поддержки принятия реше-

ния технического диагностирования радиоэлектронной аппаратуры // Актуальные проблемы вузов ВВС: межвуз. сб. Вып. 21. 2006. С. 87–94.

2. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных систем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.

3. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высш. школа, 1982. 231 с.

4. DSlib (2016). URL: <http://www.dslib.net/sys-analiz/sistema-informacionoj-podderzhki-prinjatija-dlja-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i.html> (дата обращения: 12.02.2017).

5. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Ше-

стопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. СПб: Лань, 2016. 352 с.

6. Игнатьев С.В., Тихонов В.Б., Красников А.В., Осипов А.А. Анализ системы материально-технического обеспечения эксплуатации зенитного ракетного вооружения // Вестн. Ярослав. ВВУ ПВО. 2016. Вып. 2. С. 52–57.

7. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. 336 с.

8. Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В. Дискрет-

ная математика. М.: Астрель, 2003. 447 с.

9. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

10. Игнатьев С.В., Тихонов В.Б., Осипов А.А. и др. Модель движения материальных потоков системы материально-технического обеспечения радиоэлектронной аппаратуры: Свид. о регистр. прогр. для ЭВМ № 2016610952; Рос. Федерация. Дата регистрации 22.01.2016.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.119.510-516

Received 13.02.17

2017, vol. 30, no. 3, pp. 510–516

A SPATIO-TEMPORAL MODEL OF A MATERIAL AND TECHNICAL RESOURCES TRAFFIC NETWORK OF A RADIO-ELECTRONIC FACILITIES GROUP EXPLOITATION

S.V. Ignatev¹, *Dr.Sc. (Engineering), Professor*

V.B. Tikhonov¹, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor*

A.V. Krasnikov¹, *Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer*

A.A. Osipov¹, *Adjunct, alexalexosipov@mail.ru*

¹ Yaroslavl Higher Military College of Air Defense, Moskovsky Ave., 28, 150001, Yaroslavl, Russian Federation

Abstract. Support of complicated radio-electronic facilities (REF) reliability at the established level mostly depends on the operation effectiveness of the current technical exploitation system, with the logistic system (LS) as one of the component part.

The main task of the LS is considered to be well-timed supply of material resources (MR), which are necessary for REF proper exploitation. At the same time, the task of fast and proper decision-making when controlling necessary resources supply becomes relevant due to considerable space diversity and remoteness of special-purpose systems with REF as the basic element from storage and maintenance bases. To perform the task it is necessary to know possible (preferable) routes of MR delivery, taking into consideration emergency situations, traffic jams, roadways heavy maintenance, natural disasters and other factors, as well as the choice of optimal route variants according to the desired time value and/or MR delivery cost. Taking into account the above-mentioned facts, this research suggests a spatio-temporal model of logistics system of the group of radio-electronic facilities transportation network exploitation. This model can help to solve the task of selecting preferable MR delivery routes according to established criteria.

Keywords: logistic system, radio-electronic facilities, material resources, spatio-temporal model, transportation network, graph.

References

1. Ignatev S.V., Zosiev V.V., Tchernyak A.V., Malyshev A.V. Functional structure of decision support system for technical diagnostics of radio electronic equipment. *Aktualnye problemy vuzov VVS: Mezhd. sb. nauch. tr.* [Contemporary Issues of Air Force Universities: Interacademic Collected Papers]. Moscow, Ministry of Defence of the Russian Federation Publ., 2006, iss. 21, pp. 87–94.

2. Davydov P.S. *Tekhnicheskaya diagnostika radioelektronnykh sistem* [Technical Diagnostics of Radio Electronic Systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1998, 256 p.

3. Barzilovitch E.Yu. *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh sistem* [Models for Complex System Maintenance]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1982, 231 p.

4. *DSLlib*. 2016. Available at: <http://www.dslib.net/sys-analiz/sistema-informacionoj-podderzhki-prinjatija-dlja-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i.html> (accessed February 12, 2017).

5. Dorokhov A.N., Kernozhitsky V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Ensuring Reliability of Complex Technical Systems]. 2nd ed., St. Petersburg, Lan Publ., 2016, 352 p.

6. Ignatev S.V., Tikhonov V.B., Krasnikov A.V., Osipov A.A. Analysis of the material support system for anti-aircraft missile weapons operating. *Vestn. Yaroslavskogo VVU PVO* [Bulletin of Yaroslavl Higher Military College of Air Defense]. Yaroslavl, Yaroslavl VVU PVO Publ., 2016, iss. 2.

7. Ore O. *Teoriya grafov* [Theory of Graphs]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 336 p.

8. Gorbatov V.A., Gorbatov A.V., Gorbatova M.V. *Diskretnaya matematika* [Discrete Mathematics]. Moscow, Astrel Publ., 2003, 447 p.

9. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmitschesky podkhod* [Theory of Graphs. Algorithmic Approach]. Moscow, Mir Publ., 1978, 432 p.

10. Ignatev S.V., Tikhonov V.B., Osipov A.A. *Model dvizheniya materialnykh potokov sistemy materialno-tekhnicheskogo obespecheniya radioelektronnoy apparatury* [A Motion Model of Material Flows of the Material and Technical Support System for Radio Electronic Equipment]. State registration Certificate of the computer program № 2016610952. 2016 (in Russ.).