УДК: 004.942

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕНЫ СОСТОЯНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ МОБИЛЬНЫХ ДАТА-ЦЕНТРОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

И.Б. Паращук, А.В. Михайличенко (Санкт-Петербург)

Важнейшим условием обеспечения эффективности управления войсками, силами и оружием является разработка и применение новой информационно-телекоммуникационной инфраструктуры в оборонной сфере, использование всех возможностей единого информационного пространства Вооруженных сил Российской Федерации.

Базовым компонентом существующей и перспективной инфраструктуры Вооруженных сил Российской Федерации являются современные дата-центры, зачастую называемые центрами обработки данных [1]. Дата-центр военного назначения (ВН) представляет собой комплекс аппаратуры хранения и обработки данных, иной информационной, телекоммуникационной и инженерной аппаратуры, подключенной к каналам связи. Это совокупность организационных и программно-аппаратных средств, предназначенных для создания высокопроизводительной и отказоустойчивой информационной архитектуры, отвечающей за обработку и хранение данных в интересах системы управления войсками, силами и оружием.

Мировая практика показывает, что требования, предъявляемые к реальным высокомобильным боевым действиям, условия применения сил и средств в современной сетецентричекой войне обуславливают необходимость поиска и применение новых аппаратно-программных и технологических решений по хранению и обработке больших массивов гетерогенных данных. При этом такие данные должны быть максимально приближены к местам расположения пользователей – должностных лиц органов управления Вооруженных сил Российской Федерации, к точкам принятия управленческих решений, включая полевые пункты управления вблизи линии соприкосновения войск либо в сложных климатических районах, включая пустынную зону либо Арктику. Тем самым подчеркивается необходимость в мобильности систем хранения, важность платформенной переносимости данных, которые все более востребованы военными пользователями – должностными лицами органов управления Вооруженных сил Российской Федерации. Это обуславливает актуальность создания и применения гибких и масштабируемых систем хранения данных, таких, как мобильные дата-центры (МДЦ).

К МДЦ ВН относятся контейнерные дата-центры и центры обработки данных на мобильной платформе, которые удобны в транспортировке и способны работать в любой местности. Они являются полноценными одномодульными аналогами классических стационарных дата-центров, но размещаются либо в специальном боксе на транспортной базе (автомобиль, судно, самолет), либо в специализированном транспортном контейнере (для перевозки железнодорожным, автомобильным или водным транспортом) [2, 3].

Иными словами, МДЦ являются важным и эффективным инструментом в военной информационной инфраструктуре, от их технической надежности многое зависит в устойчивом, непрерывном, оперативном и скрытном управлении войсками, силами и оружием. Однако пока не существует единого подхода в вопросах оценки и обеспечения надежности МДЦ ВН. Эти обстоятельства делают, безусловно, актуальной

проблему выработки нового, системного подхода в вопросах оценивания и обеспечения технической надежности систем такого класса.

При этом базовым этапом создания новых методологических подходов к оценке надежности является этап формулировки множества контролируемых показателей надежности (ПН) МДЦ ВН и построение аналитических моделей процессов смены состояний этих ПН. Данные модели позволят формализовать и учесть динамику изменения значений ПН в условиях неопределенности информации о среде, характере, степени, периодичности и особенностях конструктивных и деструктивных воздействий на надежность контролируемого МДЦ ВН.

Показатели надежности МДЦ ВН призваны количественно характеризовать, в какой степени данной системе присущи свойства, обуславливающие ее техническую надежность. При этом ПН обычно рассматривают различные аспекты надежности МДЦ ВН – безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость [4].

В частности, с точки зрения ремонтопригодности МДЦ ВН на *k*-ом шаге его функционирования, вектор ПН, характеризующих его ремонтопригодность, может содержать:

$$\vec{R}_{\text{рп}}(k) = [\bar{t}^{\text{э}}_{\text{врс}}(k);\, K^{\text{э}}_{\text{врс}}(k);\;\, \lambda^{\text{э}}_{\text{врс}}(k);\, \overline{\Omega}^{\text{э}}_{\text{врс}}(k)]^{\text{т}}\ , \qquad (1)$$

где $\bar{t}^{\text{э}}_{\text{врс}}(k)$ – среднее время восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МДЦ или МДЦ ВН в целом на *k*-ом шаге его функционирования;

$K^{\text{э}}_{\text{врс}}(k)$ – коэффициент восстановления работоспособного состояния за отведенный промежуток времени;

$\lambda^{\text{э}}_{\text{врс}}(k)$ – интенсивность потока восстановления работоспособного состояния;

$\overline{\Omega}^{\text{э}}_{\text{врс}}(k)$ – средняя трудоемкость восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МДЦ или МДЦ ВН в целом на *k*-ом шаге его функционирования.

Именно эти ПН численно характеризуют свойство МДЦ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания, т.е., аспект технической надежности, именуемый ремонтопригодность МДЦ ВН.

Математическое моделирование, аналитическое описание процесса смены состояний этих ПН МДЦ ВН может быть осуществлено на основе управляемых цепей Маркова (УЦМ) в форме разностных стохастических уравнений (РСУ) [5, 6]

При этом модель в виде УЦМ в форме РСУ для рассматриваемой предметной области описывает процесс смены состояний ПН МДЦ ВН на *k*-ом, (*k*+1)-ом, (*k*+2)-ом и т.д., шаге его функционирования и имеет вид:

$$\vec{x}(k+1) = \text{C}^{\text{т}}(k+1)\,\vec{\Theta}(k+1); \qquad (2)$$

$$\vec{\Theta}(k+1) = \varphi^{\text{т}}(k+1,k,u)\;\vec{\Theta}(k) + \Delta\vec{\Theta}(k+1); \qquad (3)$$

$$\vec{z}(k+1) = \text{H}(k,\vec{x}(k))\,\vec{\Theta}(k+1) + \vec{\omega}(k+1), \qquad (4)$$

где выражение (2) – уравнение состояния ПН МДЦ ВН на следующем, (*k*+1)-ом шаге его функционирования, в котором: $\vec{x}(k+1)$ – вектор-столбец значений конкретного ПН МДЦ ВН на (*k*+1)-ом шаге его функционирования, например, вектор значений среднего время восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МДЦ $\bar{t}^{\text{э}}_{\text{врс}}(k+1)$, причем все элементы этого вектора кроме одного (реального значения среднего время восстановления на данном шаге), равны 0;

$\text{C}^{\text{т}}(k+1)$ – транспонированная диагональная квадратная матрица (порядка *m*)

возможных значений конкретного ПН МДЦ ВН на (k+1)-ом шаге его функционирования, причем число m (строк и столбцов) зависит от выбранного числа состояний (глубины моделирования);

$\vec{\Theta}(k+1)$ – вспомогательный вектор-столбец индикаторов состояния конкретного ПН МДЦ ВН на (k+1)-ом шаге его функционирования, вводимый для удобства записи динамики перехода этого ПН из состояния в состояние. Выражение (3) – уравнение состояния вспомогательного вектора индикаторов, в котором: $\varphi^{\text{т}}(k+1,k,u)$ – транспонированная квадратная матрица (порядка m) вероятностей перехода ПН из состояния в состояние на (k+1)-ом шаге функционирования МДЦ ВН;

$\vec{\Theta}(k)$ – вектор-столбец значений индикаторов состояния ПН МДЦ ВН на предыдущем шаге;

$\Delta\vec{\Theta}(k+1)$ – вектор-столбец компенсационных добавок (приращений) индикаторов состояния, элементы которого предназначены для компенсации нецелочисленной части выражения (2) и могут быть получены в результате коррекции исходного шума возбуждения, с математическим ожиданием и дисперсией, соответствующими начальному состоянию моделируемого процесса смены состояний ПН МДЦ ВН [5].

Выражение (4) в системе уравнений (2)-(4), аналитически описывающих процесс смены состояний ПН на (k+1)-ом шаге функционирования МДЦ ВН, является уравнением наблюдения за процессом (процессом смены состояний ПН), где $\text{H}(k,\vec{x}(k))$ – диагональная квадратная матрица (порядка m) наблюдаемых значений ПН МДЦ ВН, а $\vec{\omega}(k+1)$ – вектор белых шумов наблюдения с нулевым средним и матрицей дисперсии $\delta_{\omega}(k+1)$ [5]. Таким образом, выражениями (2)-(4) представлен вариант аналитического описания (в терминах марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений), динамики изменения состояний ПН на (k+1)-ом шаге функционирования МДЦ ВН.

В рамках этого аналитического описания важнейшим, основополагающим, базовым элементом этой системы уравнений, кардинально влияющим на процесс смены состояний ПН, является элемент $\varphi^{\text{т}}(k+1,k,u)$ – транспонированная квадратная матрица (порядка m) вероятностей перехода ПН из состояния в состояние на (k+1)-ом шаге функционирования МДЦ ВН. Элементы этой матрицы предопределяют вероятность смены состояний конкретного ПН, обусловленную не только вводимыми управляющими воздействиями (u), но и иными конструктивными либо деструктивными воздействиями на надежность контролируемого МДЦ ВН.

Таким образом, в интересах достоверного и адекватного реальным условиям аналитического описания процесса смены состояний ПН МДЦ ВН, важной задачей является поиск значений элементов матрицы $\varphi^{\text{т}}(k+1,k,u)$ одношаговых переходных вероятностей (ОПВ) марковской модели (2)-(4), которая полностью задает механизм вероятностно-временного перехода ПН из состояния в состояние.

В этой связи предложен подход, позволяющий получить элементы матрицы ОПВ с использованием имитационной модели системы массового обслуживания (СМО). Выбор имитационной модели такого типа обусловлен тем, что к СМО традиционно может быть отнесено достаточно большое количество реальных систем, например, системы связи, ремонтные и сервисные фирмы, компьютерные сети, аэропорты, морские порты и т.д.

Рассмотрена математическая реализация имитационного решения задачи определения элементов матрицы ОПВ для аналитической моделей динамики и статики

многоканальной марковской СМО с ограниченной очередью типа *M*/*M*/*n*/*N*, где *n* – число каналов обслуживания заявок, *N* – длина очереди. На вход имитационной модели СМО поступает поток заявок с интенсивностью *X*. Интенсивность обслуживания в каждом из каналов равна μ .

При определении элементов матрицы ОПВ $\varphi^{т}(k+1,k,u)$ марковской модели смены состояний ПН $\bar{t}^{э}_{врс}(k)$ – среднего времени восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МДЦ ВН, воспользуемся статистическими данными относительно потоков требований на ресурс восстановления (ремонта) системы технического обслуживания и ремонта (СТОиР) техники связи и АСУ со свободным доступом [6].

В работах [7-9] получен ряд аналитических выражений, определяющих взаимосвязь между временем восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) $t^{э}_{врс}(k)$ и количеством элементов (устройств) МДЦ, находящихся на обслуживании – на ремонте и восстановлении (в очереди) $\eta_{но}(k)$. Пользуясь этими данными, изменения состояния процесса восстановления работоспособного состояния в СТОиР достаточно полно можно проследить, наблюдая изменения числа элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся на обслуживании (ремонте и восстановлении) $\eta_{но}(k)$.

Таким образом, предлагаемая имитационная модель призвана выполнить необходимое условие построения достоверного аналитического описания и формирования адекватной математической модели данного процесса в рамках УЦМ определение элементов матрицы ОПВ, характеризующей вероятность перехода процесса ($\eta_{но}(k)$) из состояния в состояние.

С точки зрения формального математического описания и нормального функционирования имитационной модели типа СМО, относительно процесса восстановления работоспособного состояния необходимо сделать ряд допущений [10]:

1. входящие потоки требований на ресурс восстановления (ремонта) СТОиР ($\eta_{т}(k)$) являются простейшими с интенсивностями λ_{ij} ($\Lambda = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\lambda_{ij}$ – суммарная интенсивность потоков требований на ресурс восстановления (ремонта));
2. распределение длительности обслуживания требований на ресурс восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН является экспоненциальным с параметром μ;
3. число единиц ресурса восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН (*n*) и число мест в очереди (*N*) ограничено;
4. время ожидания в очереди восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН $\xi(v)$ является ограниченным и распределенным по экспоненциальному закону с параметром (v);
5. дисциплина обслуживания в очереди восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН – в порядке поступления.

В соответствии с принятой классификацией, данную имитационную модель СМО для анализа параметров процесса восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН можно отнести к типу моделей СМО *M*/*M*/*n*/*N*. Для имитационных марковских моделей СМО такого класса разработана методология определения значений элементов матрицы интенсивностей перехода процесса ($\eta_{но}(k)$) из одного состояния в другое:

$$\left|q_{ml}\right| = \begin{vmatrix} q_{11}(k+1,k) & q_{12}(k+1,k) & q_{13}(k+1,k) \\ q_{21}(k+1,k) & q_{22}(k+1,k) & q_{23}(k+1,k) \\ q_{31}(k+1,k) & q_{32}(k+1,k) & q_{33}(k+1,k) \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Учитывая взаимосвязь значений элементов матрицы ОПВ и интенсивностей изменения состояния процесса восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН, получим:

$$\varphi(k+1,k): \begin{cases} p_{ml}(k+1,k) = \mathrm{T}\, q_{ml}(k+1,k) + \mathrm{O}\,\mathrm{T} \\ p_{mm}(k+1,k) = 1 - \mathrm{T}\, q_{mm}(k+1,k) + \mathrm{O}\,\mathrm{T} \end{cases}, \quad (6)$$

где $\mathrm{T} = (t_k - t_{k\text{-}1})$ – соответствующий длительности шага k интервал времени между сменой состояний, который должен удовлетворять условию $0 \le \mathrm{T} \le \tau_{\text{кор}}$, а О – символ операции обслуживания заявки, т.е., операции восстановления (ремонта) элемента МДЦ ВН.

Известно [10, 11], что в рамках имитационной модели понимая под состоянием СМО – СТОиР в k-ый момент времени, количество элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся в очереди на восстановление (ремонт), можно представить множество возможных состояний процесса $\eta_{\text{но}}(k)$ в виде:

$$M = \{m\}, \quad m = \overline{0, n+N}. \quad (7)$$

Тогда интенсивности перехода процесса $\eta_{\text{но}}(k)$ из одного состояния в другое в рамках имитационной модели СМО в интересах определения элементов матрицы ОПВ могут быть определены следующим образом [10]:

1. При $0 \le m \le n$ могут выполняться одна фиктивная операция ожидания требований на ресурс СТОиР (ожидания восстановления работоспособности) O_0 и m операций обслуживания требований на ресурс СТОиР (операций восстановления работоспособности) $\mathrm{O}_1, \ldots, \mathrm{O}_m$, а соответствующая им интенсивность перехода равна:

$$q_{ml}(k+1,k) = \begin{cases} \lambda & \text{при } l = m+1 \\ m\,\mu & \text{при } l = m-1 \\ 0 & \text{при } |l-m| \ge 2 \end{cases}. \quad (8)$$

2. При $m = 0$ имеем:

$$q_{0l}(k+1,k) = \begin{cases} \lambda & \text{при } l = 1 \\ 0 & \text{при } l \ge 2 \end{cases}. \quad (9)$$

3. При $n < m < n+N$ выполняется одна фиктивная операция ожидания требования на ресурс СТОиР (ожидания восстановления работоспособности) O_0, n операций обслуживания требований на ресурс СТОиР (операций восстановления работоспособности) $\mathrm{O}_1, \ldots, \mathrm{O}_n$, и $(m–n)$ фиктивных операций «ожидания потери требования на ресурс СТОиР» (ожидания потери заявки на восстановление работоспособности). В этом случае:

$$q_{ml}(k+1,k) = \begin{cases} \lambda & \text{при } l = k+1 \\ n\,\mu + (m-n)\,\nu & \text{при } l = k-1 \\ 0 & \text{при } |m-l| \ge 2 \end{cases}. \quad (10)$$

4. Для случая $m = n+N$ интенсивность перехода определяется:

$$q_{(n+N)l}(k+1,k)=\begin{cases} n\mu+N\nu & \text{при } l=(n+N)-1 \\ 0 & \text{при } l<(n+N)-1 \end{cases}. \qquad (11)$$

Начальное распределение вероятностей состояний показателя восстановления работоспособности при условии, что в момент времени k = 0 СТОиР свободна от требований на ресурс восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН, определяют как:

$$P(0;\eta_{\text{но}}(0))=\begin{cases} 1 & \text{при } m=0 \\ 0 & \text{при } m>0 \end{cases}. \qquad (12)$$

Нетрудно показать [10, 11], что механизм вероятностно-временного перехода полностью задает модель смены состояний процесса восстановления (ремонта) элементов МДЦ ВН и может быть представлен в терминах цепей Маркова в форме РСУ. Уравнения состояния в этом случае будут иметь вид:

$$\begin{gathered} \eta_{\text{но}}(k)=\mathrm{C}^{\text{т}}(k;\ \eta_{\text{но}}=m)\,\vec{\Theta}(k);\quad \eta_{\text{но}}(0)=0; \\ \vec{\Theta}(k)=[\mathrm{A}+Q^{\text{т}}(k,k-1,u)]\,\vec{\Theta}(k-1)+\Gamma(k-1)\mathrm{V}(k-1), \end{gathered} \qquad (13)$$

где все обозначения соответствуют введенным ранее, а $Q(k,k-1,u)=q_{ml}(k,k-1,u)$ – матрица интенсивностей перехода.

Тогда, по аналогии с работой [11], финальные вероятности значений числа элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся на обслуживании (на восстановлении, ремонте) для установившегося режима работы СТОиР, могут быть определены из выражения:

$$\pi_m=\begin{cases} \dfrac{\alpha^m/m!}{\sum\limits_{s=1}^{n}\dfrac{\alpha^s}{s!}+\dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{N-1}\dfrac{\alpha^s}{\prod\limits_{r=1}^{s}(n+r\beta)}} & \text{при} \quad m=\overline{0,n}; \\[2ex] \dfrac{\alpha^m/(n!\prod\limits_{r=1}^{s}(n+r\beta))}{\sum\limits_{s=1}^{n}\dfrac{\alpha^s}{s!}+\dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{N}\dfrac{\alpha^s}{\prod\limits_{r=1}^{s}(n+r\beta)}} & \text{при} \quad m=\overline{n+1,n+N}, \end{cases} \qquad (14)$$

где $\alpha=\lambda/\mu$, $\beta=\nu/\mu$.

Пользуясь выражением (14), можно в рамках имитационной модели определить среднее число требований на ресурс СТОиР в очереди на восстановление (среднее число элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся в очереди на восстановление (ремонт) в СТОиР):

$$\mathrm{M}[\eta_{\text{о}}(\infty)]=N_Q=\sum_{r=1}^{N} r\,\pi_{n+r}, \qquad (15)$$

а также дисперсию числа требований на ресурс СТОиР в очереди на восстановление (дисперсию числа элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся в очереди на восстановление ремонт в СТОиР):

$$\mathrm{D}[\eta_{\text{о}}(\infty)]=\sum_{r=1}^{N}(r-m_{\eta_{\text{о}}})^2\,\pi_{n+r}. \qquad (16)$$

Рассмотрим, как на основе выражений (7) – (16), составляющих математическую основу имитационной модели, интерпретируются элементы матрицы ОПВ состояний процесса $\eta_{\text{но}}(k)$ в элементы матрицы ОПВ процесса смены состояний ПН $\bar{t}^{\text{э}}_{\text{врс}}(k)$ –

среднего времени восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МДЦ ВН. Очевидно, что:

$$\bar{t}^{\,э}_{врс}(k) = 0, \text{ при } m \le n,$$

$$0 < \bar{t}^{\,э}_{врс}(k) \le \bar{t}^{\,э\ тр}_{врс}, \text{ при } m \le n + N, \tag{17}$$

где m, n и N – обозначения, используемые для процесса $\eta_{но}(k)$. Если ограничить процесс смены состояний ПН МДЦ ВН $\bar{t}^{\,э}_{врс}(k)$ тремя состояниями, т.е., условно считать, что индикаторы трех состояний этого конкретного ПН равны:

$$\Theta_1(\bar{t}^{\,э}_{врс}) = \begin{cases} 1 & - \text{ если } 0 \le \bar{t}^{\,э}_{врс} \le \bar{t}^{\,э\ пор_1}_{врс}, \\ 0 & - \text{в противном случае;} \end{cases} \tag{18}$$

$$\Theta_2(\bar{t}^{\,э}_{врс}) = \begin{cases} 1 & - \text{ если } \bar{t}^{\,э\ пор_1}_{врс} \le \bar{t}^{\,э}_{врс} \le \bar{t}^{\,э\ пор_2}_{врс}, \\ 0 & - \text{в противном случае;} \end{cases} \tag{19}$$

$$\Theta_3(\bar{t}^{\,э}_{врс}) = \begin{cases} 1 & - \text{ если } \bar{t}^{\,э}_{врс} > \bar{t}^{\,э\ пор_2}_{врс}, \\ 0 & - \text{в противном случае,} \end{cases} \tag{20}$$

то можно записать:

$$\vec{\Theta}(\bar{t}^{\,э}_{врс}) = \begin{cases} \Theta_1 = 1; \Theta_2 = \Theta_3 = 0, \text{ при } 0 < m \le n + N - d, \\ \Theta_2 = 1; \Theta_1 = \Theta_3 = 0, \text{ при } n + N - d < m \le n + N, \\ \Theta_3 = 1; \Theta_1 = \Theta_2 = 0, \text{ при } m > n + N, \qquad m = \overline{0, M}. \end{cases} \tag{21}$$

Тогда в рамках имитационного моделирования уравнение состояния для среднего времени восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МДЦ ВН определяется выражением (см. выражение (2)):

$$\bar{t}^{\,э}_{врс}(k+1) = \mathrm{C}^{т}(k+1)\,\vec{\Theta}(k+1), \tag{22}$$

где $\mathrm{C}^{т}$ – транспонированная диагональная матрица возможных значений ПН $\bar{t}^{\,э}_{врс}$, элементы которой для трех состояний $\bar{t}^{\,э}_{врс}$ принимают значения:

$$\left|\mathrm{C}^{т}\right| = \begin{vmatrix} 0 \le t^{э}_{врс} \le t^{э\ пор_1}_{врс} & 0 & 0 \\ 0 & t^{э\ пор_1}_{врс} \le \bar{t}^{\,э}_{врс} \le t^{э\ пор_2}_{врс} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{t}^{\,э}_{врс} > \bar{t}^{\,э\ пор_2}_{врс} \end{vmatrix}. \tag{23}$$

С учетом того, что на основе теоремы Литтла [12] $\bar{t}^{\,э}_{врс} = \dfrac{N_Q}{\lambda}$, в рамках данной имитационной модели для количества элементов (устройств) МДЦ, находящихся на обслуживании – на ремонте и восстановлении (в очереди) $\eta_{но}(k)$, получим выражение для среднего времени восстановления работоспособного состояния:

$$\bar{t}^{\,э}_{ож} = \frac{\sum_{r=1}^{N} r\,\pi_{n+r}}{\Lambda}, \tag{24}$$

где $\Lambda = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\lambda_{ij}$ – суммарная интенсивность потоков требований на ресурс восстановления (ремонта) элементов (устройств) МДЦ ВН.

Таким образом, имея в рамках имитационной модели матрицу вероятностей перехода процесса $\eta_{но}(k)$ для m множества состояний при различных n и N, учитывая

зависимость пороговых значений состояний процессов $\eta_{но}(k)$ и $\bar{t}^{э}_{врс}(k)$ и вводя пороги для состояний $\bar{t}^{э}_{врс}(k)$, можем получить элементы матрицы ОПВ для ПН $\bar{t}^{э}_{врс}(k)$ для любого k-го момента времени ($0 \le k \le \infty$).

В рамках имитационной модели введем следующие состояния ПН МДЦ ВН и соответствующие им вероятности:

1. состояние «исправная работа»: вероятность $P_1(0 \le t^{э}_{врс} \le t^{э\ пор_1}_{врс})$, что соответствует наличию в очереди на использование ресурса СТОиР от 0 до $n+N–d$ требований на восстановление (наличию от 0 до $n+N–d$ элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся в очереди на восстановление (ремонт));

2. состояние «предупреждение»: вероятность $P_2(t^{э\ пор_1}_{врс} \le \bar{t}^{э}_{врс} \le t^{э\ пор_2}_{врс})$, что соответствует наличию в очереди на использование ресурса СТОиР от $n+N–d$ до $n+N$ требований (наличию от 0 до $n+N–d$ элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся в очереди на восстановление (ремонт));

3.состояние «авария»: вероятность $P_3(\bar{t}^{э}_{врс} > t^{э\ пор_2}_{врс})$, что соответствует наличию в очереди на использование ресурса СТОиР больше $n+N$ требований (наличию более чем $n+N$ элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся в очереди на восстановление (ремонт)).

Тогда в рамках имитационной модели возможно получение элементов матрицы ОПВ, которые вычисляются как:

$$
\begin{aligned}
&p_{11} = \sum_{i=1}^{n+N-d} \sum_{j=1}^{n+N-d} p_{ij}; && p_{21} = \sum_{i=n+N-d}^{n+N} \sum_{j=1}^{n+N-d} p_{ij};\\
&p_{12} = \sum_{i=1}^{n+N-d} \sum_{j=n+N-d}^{n+N} p_{ij}; && p_{32} = \sum_{i=n+N}^{n+N+m} \sum_{j=n+N-d}^{n+N} p_{ij};\\
&p_{22} = \sum_{i=n+N-d}^{n+N} \sum_{j=n+N-d}^{n+N} p_{ij}; && p_{33} = \sum_{i=n+N}^{n+N+m} \sum_{j=n+N}^{n+N+m} p_{ij};\\
&p_{23} = 1 - p_{21} - p_{22}; \quad p_{13} = p_{31} = 0.
\end{aligned}
\tag{25}
$$

Таким образом, в рамках имитационной модели найдена математическая взаимосвязь количества требований на ресурс СТОиР, т.е., количества элементов (устройств) МДЦ ВН, находящихся на обслуживании (на восстановлении) и в очереди на восстановление и ремонт. Сформулированы значения состояний $\eta_{но}(k)$, соответствующие пороговым значениям состояний ПН $\bar{t}^{э}_{врс}(k)$ – среднего времени восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МДЦ ВН.

Полученные на основе приведенных выражений результаты имитационного моделирования позволяют получить численные исходные данные для достоверного аналитического описания процесса смены состояний ПН – значения элементов матрицы ОПВ, которые характеризуют вероятности перехода из состояния в состояние такого ПН, как среднее время восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) мобильного дата-центра военного назначения.

Литература

1. Концепция развития информационных и телекоммуникационных технологий Вооруженных Сил Российской Федерации на период до 2025 года. М.: МО РФ, 2015. 16 с.
2. **Михайличенко Н.В.** Сравнительный анализ технологий построения региональных центров обработки данных // Юбилейная XV-ая Санкт-Петербургская

международная конференция «Региональная информатика 2016», СПб.: СПОИСУ, 2016. С.102-103.
3. Мобильный модульный центр обработки данных. [2017]. URL: http://piterenergomash.ru/index.php/katalog-produktsii/kontejnernye-resheniya/ kontejnernye-tsod (дата обращения 03.03.2022).
4. **Андреев А.В., Яковлев В.В., Короткая Т.Ю.** Теоретические основы надежности технических систем. Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 164 с.
5. **Ковальченко Д.А., Ногин С.Б., Паращук И.Б.** Анализ подходов к аналитическому моделированию смены состояний процессов, реализуемых системами передачи информации // Юбилейная 70-я НТК НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященная дню Радио. Труды конференции. Том 1. СПб.: НТОРЭС, 2015. С. 131-133.
6. **Терентьев В.М., ПаращукИ.Б.** Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи. СПб.: ВАС, 1995. 195 с.
7. **Абышко В.Ю.** Техническое обеспечение связи и автоматизации. СПб.: ВАС, 2010. – С. 243-272.
8. **Плут М.Н., Чубарев К.С., Мякотин А.В., Кривцов С.П., Суслов А.Н.** Показатели оценки качества системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления // Известия Тульского ГУ. Технические науки. 2020. Вып. 5. С. 293-296.
9. **Плотников Ю.В., Чихачев А.В.** Концептуальная модель восстановления средств связи оперативного объединения агрегатным методом ремонта // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: межвузовская научно-практическая конференция (Санкт-Петербург, 9 февраля 2016 г.) / Под ред. С. С. Семенова. СПб: Наукоемкие технологии, 2016. С. 230-236.
10. **Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н.** Теория массового обслуживания. М.: Высшая школа, 1982. 256 с.
11. **Терентьев В.М.** Автоматизированные системы управления сетями многоканальной радиосвязи. Л.: ВАС, 1986. 116 с.
12. **СазоновВ.В., Паращук И.Б., Логинов В.А., Елизаров В.В.** Математическое обеспечение АСУ войсками: Учеб. пособие / под ред. проф. И.Б. Паращука. СПб.: ВАС, 2018. 256 с.