

УДК: 004.75; 004.052; 004.056

DOI: 10.53816/23061456_2022_7-8_85

**МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СМЕНЫ СОСТОЯНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НАДЕЖНОСТИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
МОБИЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

**MODEL OF THE PROCESS OF CHANGING THE STATES
OF INDICATORS OF RELIABILITY AND INFORMATION SECURITY
OF MOBILE DATA CENTERS**

А.В. Михайличенко

A.V. Mikhailichenko

ВАС им. С.М. Буденного

Статья посвящена вопросам моделирования процесса смены состояний показателей надежности и информационной безопасности мобильных дата-центров — сложных, управляемых систем хранения и обработки информации, обладающих архитектурной гибкостью и масштабируемостью. В статье автор предпринял попытку сформулировать новый подход к моделированию процесса функционирования мобильных центров обработки данных с точки зрения анализа их технической надежности и защищенности. Предложенная модель опирается на классические управляемые цепи Маркова в форме разностных стохастических уравнений и позволяет получать текущие значения показателей надежности и информационной безопасности с учетом динамики смены их дискретных состояний в дискретные моменты времени. Предполагается, что предложенная модель ляжет в основу разрабатываемой автором методики многокритериального анализа надежности и информационной безопасности мобильных центров обработки данных.

Ключевые слова: мобильный центр обработки данных, пространство состояний, показатель, надежность, информационная безопасность, математическая модель, процесс смены состояний, марковская цепь.

The article is devoted to modeling the process of changing the states of reliability and information security indicators of mobile data centers — complex, managed information storage and processing systems with architectural flexibility and scalability. In the article, the author has attempted to formulate a new approach to modeling the process of functioning of mobile data centers, from the point of view of analyzing their technical reliability and security. The proposed model is based on classical controlled Markov chains in the form of difference stochastic equations and allows us to obtain the current values of reliability and information security indicators taking into account the dynamics of their discrete states change at discrete points in time. It is assumed that the proposed model will form the basis of the methodology of multi-criteria analysis of reliability and information security of mobile data centers developed by the author.

Keywords: mobile data center, state space, indicator, reliability, information security, mathematical model, state change process, Markov chain.

Рост международной напряженности и нарастание угроз безопасности России объективно формируют военно-политическую обстановку, при которой совершенствование систем управления силами и средствами вооруженной борьбы становится не просто закономерной, а необходимой, жизненно важной задачей. В этой связи наиболее актуальными являются задачи оперативного доведения боевой информации до пунктов управления войсками и оружием любого уровня, в любой местности и эшелоне (сухопутный, морской, воздушный), в кратчайшие сроки и с требуемым качеством.

Поэтому все более важное значение приобретают военно-политические и технологические аспекты развития силовых структур Российской Федерации, нацеленные на переход на качественно новый, инновационный уровень управления войсками и оружием. Очевидны безусловная необходимость и возрастание роли создания и совершенствования единого информационно-разведывательного пространства. При этом одним из ключевых условий для обеспечения своевременного и точного управления войсками и оружием является построение и применение новой информационно-телекоммуникационной инфраструктуры Вооруженных Сил Российской Федерации.

Одними из наиболее важных, узловых компонентов такой информационно-телекоммуникационной инфраструктуры считаются центры обработки данных (ЦОД), в зарубежной литературе именуемые дата-центрами [1, 2].

Это не просто отдельное помещение либо здание, предназначенное для размещения и эксплуатации производительного вычислительного оборудования, а взаимоувязанная по целям, согласованная по времени и развернутая на местности взаимосвязанная совокупность организационных и программно-аппаратных средств, а также обслуживающих должностных лиц, предназначенных для создания высокоэффективной и отказоустойчивой инфраструктуры. При этом ЦОД создает благоприятные условия для оборудования, персонала, который его обслуживает, и для пользователей, предоставляя последним услуги по обработке и хранению информации в интересах системы управления войсками и оружием [1, 3, 4].

Вместе с тем внимание специалистов в области создания и сопровождения информаци-

онно-телекоммуникационной инфраструктуры силовых ведомств все чаще привлекают широко используемые в мире и хорошо себя зарекомендовавшие новые технологические (аппаратные и программные) решения по хранению и обработке больших данных (Big Data). Причем эти данные должны быть максимально приближены к местам дислокации пользователей. В этой связи на важную роль в информационно-телекоммуникационной инфраструктуре претендуют мобильные системы, позволяющие обеспечить доступность к хранимым и обрабатываемым данным в любом месте, позволяющие «переносить» различные типы контента на разнообразные аппаратно-программные платформы. Речь идет о гибких и масштабируемых системах хранения данных, таких как мобильные ЦОД (МобЦОД). Это либо микро-ЦОД, либо контейнерные ЦОД, либо ЦОД на подвижной транспортной базе — автомобиль, самолет, судно [5, 6].

Мобильные системы такого класса технически сложны и многогранны с точки зрения видов и количества входящих в МобЦОД аппаратно-программных средств. Все это обуславливает актуальность поиска новых, современных методологических подходов к решению задач анализа их надежности и информационной безопасности. Иными словами, необходима перспективная методологическая база, позволяющая в условиях различного рода неопределенности исходных данных анализировать техническую надежность и информационную безопасность МобЦОД в интересах оптимального архитектурного построения систем такого класса и управления ими. При этом ключевыми элементами теории и практики контроля надежности и защищенности МобЦОД являются формулировка системы показателей надежности и информационной безопасности (ПНИИБ) и математическое моделирование МобЦОД — разработка аналитических моделей процесса смены состояний этих ПНИИБ в интересах оценки их надежности и защищенности.

Таким образом, формулировка системы ПНИИБ и построение математической модели процесса смены состояний этих показателей МобЦОД в интересах анализа ее технической надежности и информационной безопасности является актуальной задачей.

Выбор и обоснование системы ПНИИБ МобЦОД могут быть построены на известных

подходах, использующих, например, гранулярные вычисления [7]. С учетом того, что ПНИИБ МобЦОД призваны количественно характеризовать, в какой степени данным объектам присущи свойства, обуславливающие ее техническую надежность и защищенность, необходимо формулировать, например, показатели технической надежности МобЦОД, сгруппированные в четыре группы: показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости [8].

Тогда подсистема показателей надежности МобЦОД в целом может быть формально представлена в виде вектора $\bar{\mathbf{X}}_{\text{н МобЦОД}}(\mathbf{k})$, состоящего из N показателей

$$\bar{\mathbf{X}}_{\text{н МобЦОД}}(\mathbf{k}) = [\Delta x_{\text{н}}^1(k); \Delta x_{\text{н}}^2(k); \dots; \Delta x_{\text{н}}^N(k)]^T, \quad (1)$$

а подсистема показателей информационной безопасности МобЦОД может быть формально представлена в виде вектора $\bar{\mathbf{X}}_{\text{иб МобЦОД}}(\mathbf{k})$, состоящего, например, из D показателей

$$\bar{\mathbf{X}}_{\text{иб МобЦОД}}(\mathbf{k}) = [\Delta x_{\text{иб}}^1(k); \Delta x_{\text{иб}}^2(k); \dots; \Delta x_{\text{иб}}^D(k)]^T,$$

где $\Delta x_{\text{н}}^n(k)$ и $\Delta x_{\text{иб}}^d(k)$ — частные показатели в виде отклонений реальных значений параметров надежности и информационной безопасности от требуемых значений.

С учетом этого вектор частных показателей надежности, характеризующих, например, ремонтпригодность МобЦОД (в рамках надежности) на k -м шаге его функционирования $\bar{\mathbf{R}}_{\text{рп}}(\mathbf{k})$, может содержать показатели в виде их отклонений от требуемых значений:

$$\bar{\mathbf{R}}_{\text{рп}}(\mathbf{k}) = [\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\circ}(k); \Delta K_{\text{врс}}^{\circ}(k); \Delta \lambda_{\text{врс}}^{\circ}(k); \Delta \bar{\Omega}_{\text{врс}}^{\circ}(k)]^T, \quad (1)$$

где $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\circ}(k)$ — отклонение от требуемых значений среднего времени восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МобЦОД или дата-центра в целом на k -м шаге его функционирования; $\Delta K_{\text{врс}}^{\circ}(k)$ — отклонение коэффициента восстановления работоспособного состояния за отведенный промежуток времени; $\Delta \lambda_{\text{врс}}^{\circ}(k)$ — отклонение от требуемых значений интенсивности потока восстановления работоспособного со-

стояния и $\Delta \bar{\Omega}_{\text{врс}}^{\circ}(k)$ — отклонение от требуемых значений средней трудоемкости восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МобЦОД или дата-центра в целом на k -м шаге его функционирования.

Эти частные показатели надежности (1), характеризующие ремонтпригодность МобЦОД, призваны численно описать приспособленность мобильного дата-центра к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

При этом не только допустимость (для некоторых случаев), но и математическая правомерность рассмотрения, в роли ПНИИБ управляемых МобЦОД, не их абсолютных значений, а отклонений данных показателей от требуемых значений, доказана в работе [9].

Предлагается математическую модель процесса смены состояний рассмотренных выше (и иных) показателей надежности и информационной безопасности сформулировать и формально описать в терминах управляемой марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений (УЦМ-PCY). Данная модель призвана описать в терминах дискретной цепи Маркова динамику изменения значений ПНИИБ в пространстве состояний.

Унифицированная математическая модель смены состояний показателя, характеризующего отклонение параметра надежности либо информационной безопасности МобЦОД от требуемых значений на следующем $(k+1)$ -м шаге функционирования (на очередном шаге, экстраполяция) мобильного дата-центра, может быть записана как [10, 11]:

$$\Delta \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{C}^T(\mathbf{k}+1) \bar{\Theta}(\mathbf{k}+1); \quad (2)$$

$$\bar{\Theta}(\mathbf{k}+1) = \Phi^T(\mathbf{k}+1, \mathbf{k}, \mathbf{u}) \bar{\Theta}(\mathbf{k}) + \Delta \bar{\Theta}(\mathbf{k}+1); \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{z}}(\mathbf{k}+1) = H(k, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k})) \bar{\Theta}(\mathbf{k}+1) + \bar{\omega}(\mathbf{k}+1), \quad (4)$$

где выражение (2) — уравнение состояния показателя, характеризующего отклонение конкретного параметра (показателя) надежности либо информационной безопасности МобЦОД от требуемых значений на $(k+1)$ -м шаге его функционирования, в котором:

$\Delta \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k} + 1)$ — вектор-столбец значений отклонений параметра надежности либо информационной безопасности МобЦОД на $(k+1)$ -м шаге его функционирования, в котором все элементы кроме одного (реального значения отклонений параметра (показателя) надежности либо информационной безопасности на данном шаге) равны 0;

$\mathbf{C}^T(\mathbf{k} + 1)$ — транспонированная диагональная квадратная матрица (порядка m) возможных значений отклонений конкретного ПНиИБ МобЦОД на $(k+1)$ -м шаге, причем число m (строк и столбцов) зависит от выбранного числа состояний конкретного ПНиИБ МобЦОД (глубины моделирования);

$\bar{\Theta}(\mathbf{k} + 1)$ — вектор-столбец вспомогательных индикаторов состояния отклонений любого конкретного ПНиИБ на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД, вводимый для удобства записи динамики перехода отклонений ПНиИБ МобЦОД из состояния в состояние.

Выражение (3) — уравнение состояния элементов вектора вспомогательных индикаторов, в котором:

$\Phi^T(\mathbf{k} + 1, \mathbf{k}, \mathbf{u})$ — транспонированная квадратная матрица (порядка m) вероятностей перехода дискретной цепи Маркова, обуславливающих смену состояний отклонений ПНиИБ на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД;

$\bar{\Theta}(\mathbf{k})$ — вектор-столбец значений индикаторов состояния отклонений ПНиИБ на предыдущем шаге;

$\Delta \bar{\Theta}(\mathbf{k} + 1)$ — вектор-столбец компенсационных добавок (приращений) индикаторов состояния, элементы которого предназначены для компенсации нецелочисленной части выражения (3) и получены в результате коррекции исходного шума возбуждения, с математическим ожиданием и дисперсией, соответствующими начальному состоянию моделируемого процесса смены состояний.

При этом расчет текущих значений индикаторов состояния отклонений ПНиИБ на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД осуществляется на основе линейной процедуры [10–12]:

$$\|\Delta \Theta(\mathbf{k} + 1)\| = \mathbf{I} - \|\Theta^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1)\|; \quad (5)$$

$$\Delta \bar{\Theta}(\mathbf{k} + 1) = \|\Delta \Theta(\mathbf{k} + 1)\| \bar{\Theta}^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1); \quad (6)$$

$$\bar{\Theta}(\mathbf{k} + 1) = \bar{\Theta}^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1) + \Delta \bar{\Theta}(\mathbf{k} + 1), \quad (7)$$

где выражение (5) описывает механизм получения элементов m -мерной матрицы компенсационных добавок $\|\Delta \Theta(\mathbf{k} + 1)\|$ и содержит элементы:

$\bar{\mathfrak{S}}$ — m -мерная единичная диагональная матрица;

$\|\Theta^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1)\|$ — m -мерная матрица, столбцами которой являются вектора нецелочисленных значений индикаторов $\bar{\Theta}^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1)$, повторенные m раз.

Выражение (6) описывает порядок выбора вектора компенсационных добавок $\Delta \bar{\Theta}(\mathbf{k} + 1)$ из матрицы компенсационных добавок $\|\Delta \Theta(\mathbf{k} + 1)\|$ с помощью вектора $\bar{\Theta}^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1)$ предварительных значений индикаторов состояний моделируемого процесса смены состояний ПНиИБ на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД.

Выражение (7) является модифицированной записью уравнения состояния моделируемого процесса смены состояний ПНиИБ, причем элементы вектора нецелочисленных значений индикаторов состояния в выражении (7) находятся в соответствии с выражением [11]:

$$\bar{\Theta}^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1) = \Phi^T(\mathbf{k} + 1, \mathbf{k}, \mathbf{u}) \bar{\Theta}(\mathbf{k}) \quad (8)$$

являющимся модификацией известного уравнения Колмогорова–Чепмена и полученным в результате преобразования выражения (3), где:

$\bar{\Theta}^{\text{мн}}(\mathbf{k} + 1)$ — вектор нецелочисленных значений индикаторов состояния моделируемого процесса (процесса смены состояний отклонений ПНиИБ на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД), имеющий математический смысл пошаговых и, в конечном итоге, финальных вероятностей нахождения случайного процесса в том или ином состоянии;

$\Phi^T(\mathbf{k} + 1, \mathbf{k}, \mathbf{u})$ — матрица вероятностей перехода ПНиИБ МобЦОД из одного состояния в другое;

$\bar{\Theta}(\mathbf{k})$ — вектор целочисленных значений индикаторов состояния моделируемого процесса смены состояний отклонений ПНиИБ на предыдущем шаге.

Выражение (8) для отдельного i -го (из m возможных) нецелочисленного индикатора состояния $\Theta_i^{\text{мн}}(k + 1)$ в общем случае имеет вид:

$$\Theta_i^{\text{мн}}(k + 1) = \Theta_1(k)(p_{i1} - p_{im}) + \Theta_2(k)(p_{i2} - p_{im}) + \dots + \Theta_{m-1}(k)(p_{i,m-1} - p_{im}) + p_{im}, \quad (9)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, m$, а $p_{i1} \dots p_{im}$ — элементы матрицы $\Phi^T(\mathbf{k} + 1, \mathbf{k}, \mathbf{u})$ вероятностей перехода ПНИИБ МобЦОД из одного состояния в другое.

Выражение (4) в системе уравнений (2)–(9), описывающих процесс смены состояний отклонения ПНИИБ на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД, является уравнением наблюдения за процессом (процессом смены состояний отклонения ПНИИБ МобЦОД), где $\mathbf{H}(\mathbf{k}, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k}))$ — диагональная квадратная матрица (порядка m) наблюдаемых значений процесса, а $\bar{\omega}(\mathbf{k} + 1)$ — вектор белых шумов наблюдения с нулевым средним и матрицей дисперсии $\bar{\delta}_\omega(\mathbf{k} + 1)$.

Таким образом, выражениями (2)–(9) представлена математическая модель (в терминах марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений), описывающая динамику изменения состояний отклонения ПНИИБ $\Delta \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k} + 1)$ от требуемых значений на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД.

С учетом описанного математического аппарата моделирования (2)–(9), а также того факта, что вероятностно-временная модель смены состояний отклонений ПНИИБ $\Delta \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k} + 1)$ от требуемых значений на $(k+1)$ -м шаге функционирования МобЦОД изначально базируется на детерминированных переменных, опишем, в качестве примера, аналитическую модель, характеризующую динамику изменения состояний одного из ПНИИБ МобЦОД — отклонений от требуемых значений среднего времени восстановления $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(k)$ работоспособного состояния элемента (устройства) МобЦОД или дата-центра в целом на k -ом шаге его функционирования:

$$\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{C}^T \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1) \bar{\Theta} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1); \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Theta} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1) = \\ = \Phi^T \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1, \mathbf{k}, \mathbf{u}) \bar{\Theta} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k}) + \Delta \bar{\Theta} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{z} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1) = \\ = \mathbf{H} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k}, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k})) \bar{\Theta} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1) + \bar{\omega} \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1). \end{aligned} \quad (12)$$

Формирование индикаторов состояний (например, трех состояний) данного показателя надежности МобЦОД и моделирование пошаговых

значений отклонений $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(k)$ осуществляется следующим образом.

Исходными данными для моделирования являются:

– требования к данному показателю надежности МобЦОД — требования к отклонениям $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}$;

– пороговые значения изменения состояний данного показателя надежности МобЦОД – пороговые значения (допуски) отклонений $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(k)$;

– матрица переходных вероятностей

$\Phi^T \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(\mathbf{k} + 1, \mathbf{k}, \mathbf{u})$, характеризующая вид и степень различного рода воздействий (внешних и внутренних, деструктивных и конструктивных), влияющих на поведение данного показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}$ в ходе процесса функционирования МобЦОД.

Анализ работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию распределений вероятностей значений различных показателей качества и надежности функционирования систем передачи информации, позволил ввести некоторые их обобщенные аналитические модели, перечень которых представлен в работе [11]. Учитывая, что для показателей надежности типа отклонений среднего времени восстановления $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}(k)$ работоспособного состояния элемента (устройства) МобЦОД от требуемых значений, справедлива вероятностная модель в виде многомерной нормальной (гауссовской) плотности распределения вероятностей, на нулевом шаге работы модели определяются значения элементов вектора начальных состояний, путем интегрирования по заданным порогам в соответствии с выражениями:

$$p_1(0) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}} \text{ пор } 1}^{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}} \text{ пор } 1} e^{-(\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}})^2 / 2} \partial \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}}; \quad (13)$$

$$p_2(0) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}} \text{ пор } 2}^{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}} \text{ пор } 2} e^{-(\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}})^2 / 2} \partial \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\bar{\sigma}} - p_1; \quad (14)$$

$$p_3(0) = 1 - p_1(0) - p_2(0). \quad (15)$$

На начальном этапе моделирования исходные (стартовые) значения вспомогательной последовательности могут быть сгенерированы датчиком белого (гауссовского) шума с

нулевым (на начальном шаге) математическим ожиданием и единичной дисперсией. Затем для каждого последующего шага корректируется математическое ожидание и дисперсия вспомогательной последовательности в соответствии с априорными данными о цепи Маркова. Используя значения элементов матрицы переходных вероятностей и значения элементов вектора начальных состояний, рассчитываются значения вероятностей состояния для следующего $(k+1)$ -го шага в соответствии с уравнением Колмогорова–Чепмена и производится сравнение рассчитанного и предыдущего значения показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}$ МобЦОД в рамках марковского процесса, что позволяет определить момент достижения цепью стационарного ре-

жима работы. На основе полученных вероятностей находят новое математическое ожидание и дисперсию значения показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}$ МобЦОД для данного шага, которые служат для модификации вспомогательной последовательности в соответствии с тенденцией поведения цепи на данном шаге.

В итоге формируется предварительное решение о значениях элементов вектора индикаторов состояния $\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{np}}(\mathbf{k}+1)$ показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}$ МобЦОД на данном шаге в зависимости от того, какое выборочное значение случайной процесса смены состояний данного показателя получено с учетом модификации шума возбуждения:

$$\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{np}}(\mathbf{k}+1) = \begin{cases} \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^1 = 1; \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^2 = \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^3 = 0; & \text{при } (-\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 1 \leq \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}(\mathbf{k}+1) \leq \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 1); \\ \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^2 = 1; \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^1 = \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^3 = 0; & \text{при } (-\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 2 \leq \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}(\mathbf{k}+1) < -\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 1) \\ & \text{или } (\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 1 < \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}(\mathbf{k}+1) \leq \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 2); \\ \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^3 = 1; \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^1 = \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^2 = 0; & \text{при } (\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 2 < \Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}(\mathbf{k}+1)) \\ & \text{или } (\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}(\mathbf{k}+1) < -\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow} \text{ пор } 2). \end{cases} \quad (16)$$

В рамках управляемой марковской цепи управление предварительным решением $\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{np}}(\mathbf{k}+1)$ с учетом порогов состояний (пороговых значений) показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}$ МобЦОД осуществляется на основе априорных сведений о матрице вероятностей перехода $\Phi_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{T}}(\mathbf{k}+1, \mathbf{k}, \mathbf{u})$ и в соответствии с вспомогательным уравнением состояния процесса (11), нецелочисленное решение которого описывается выражением:

$$\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{mn}}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{f}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{T}}(\mathbf{k}+1, \mathbf{k}, \mathbf{u}) \bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}(\mathbf{k}), \quad (17)$$

и рассчитывается для каждого шага оценивания показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}$ МобЦОД.

В результате решения уравнения (17) формируется вектор нецелочисленных значений индикаторов состояния, с помощью которого определяются элементы матрицы компенсационных добавок для получения целочисленных значений индикато-

ров для следующего итерационного шага оценивания показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}$ МобЦОД:

$$\left\| \Delta \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}(\mathbf{k}+1) \right\| = \mathbf{I} - \left\| \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{mn}}(\mathbf{k}+1) \right\|, \quad (18)$$

где $\left\| \Delta \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}(\mathbf{k}+1) \right\|$ — матрица компенсационных добавок; \mathbf{I} — единичная диагональная матрица; $\left\| \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{mn}}(\mathbf{k}+1) \right\|$ — матрица, столбцами которой являются m (где $m = 3$) векторов $\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{mn}}(\mathbf{k}+1)$.

На основе предварительных данных $\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}}^{\text{np}}(\mathbf{k}+1)$ о значениях индикаторов состояния показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\rightarrow}$ МобЦОД, определяются экстраполированные на следующий шаг значения компенсационных добавок для индикаторов каждого из возможных состояний данного показателя:

$$\Delta \bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}}^{\text{нр}}(k+1) = \left\| \Delta \Theta_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}}^{\text{нр}}(k+1) \right\| \left\| \bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}}^{\text{нр}}(k+1) \right\|. \quad (19)$$

Затем объединяются нецелочисленные значения вектора индикаторов состояния и выбранный на основе предварительного решения $\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}}^{\text{нр}}(k+1)$ столбец матрицы компенсационных добавок. Тогда вспомогательное уравнение состояния (11) имеет вид:

$$\bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}}^{\text{нр}}(k+1) = \bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}}^{\text{нр}}(k) + \Delta \bar{\Theta}_{\Delta \bar{t}_{\text{врс}}}^{\text{нр}}(k+1), \quad (20)$$

Рассмотренный пример для моделирования трех состояний дает возможность пошагово определять значения индикаторов состояния цепи, что позволяет получать наблюдения за числовыми значениями отклонения от требуемых значений среднего времени восстановления работоспособного состояния $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k)$ элемента (устройства) МобЦОД или дата-центра в целом на k -м шаге его функционирования.

Таким образом, представленная последовательность математических выражений позволяет формировать вектор индикаторов марковской цепи с заданными свойствами, реализуя аналитическую модель уравнения состояния показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k+1)$.

Из уравнения наблюдения (12) в системе уравнений (10–12) на основе полученных индикаторов состояний, определяются экстраполированные значения наблюдения за показателем надежности МобЦОД $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k+1)$ с учетом шумов наблюдения. Пример, графически иллюстрирующий работу модели и позволяющий наглядно представить моделируемый процесс смены состояний показателя надежности МобЦОД $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k+1)$, приведен на рисунке.

Как свидетельствует анализ полученных, в качестве примера, результатов моделирования, наилучшее среднее значение показателя надежности МобЦОД $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k)$, снижающее общее время восстановления работоспособного состояния элемента (устройства) МобЦОД (т.е. отрицательная область определения $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k)$ — см. график), может быть получен при интенсивности потока требований на ресурс восстановления и ремонта (ресурс подсистемы технического обслуживания и ремонта) \approx от 5 до 10 отказов элементов МобЦОД в минуту. Снижение отклонений $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k)$ может быть достигнуто и при большей интенсивности λ отказов в минуту, но это потребует перерасхода ресурса подсистемы технического обслуживания и ремонта, дополнительного перераспределения поступающих потоков отказов элементов МобЦОД (это найдет свое отражение в управляющей матрице одношаговых переходных вероятностей). Этот путь

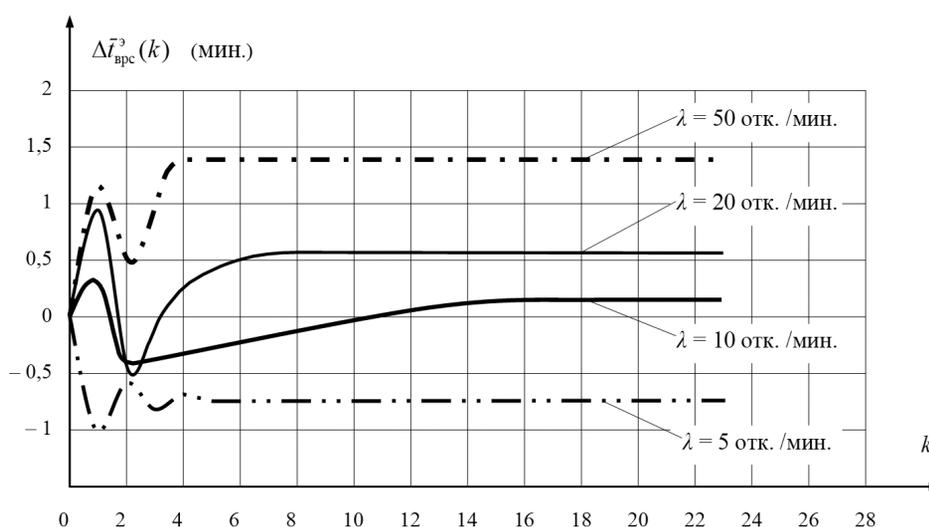


Рис. Результаты моделирования — пример графиков зависимости значений показателя надежности $\Delta \bar{t}_{\text{врс}}^{\text{нр}}(k)$ от шага функционирования МобЦОД при различной интенсивности отказов элементов дата-центра

имеет свои недостатки, поскольку ресурсы подсистемы технического обслуживания и ремонта не безграничны.

Следует отметить, что выбор соответствующей матрицы одношаговых переходных вероятностей, отражающей действующий при принятом управлении (при принятой схеме восстановления и ремонта) вероятностный механизм смены состояний конкретного показателя надежности МобЦОД, является прерогативой управляющего органа по техническому обслуживанию и ремонту, осуществляющего моделирование, анализ состояния (в части надежности и информационной безопасности) процесса функционирования мобильного дата-центра.

Выводы

Таким образом, приведенная в общем виде система УЦМ-PCY (2)–(18), а также совокупность предложенных в качестве примера систем уравнений (10)–(20), представляют собой математическую модель — формализованное описание (в терминах марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений) динамики изменений численных значений существенных свойств МобЦОД — их надежности и информационной безопасности, в пространстве состояний.

Предложенная модель позволяет определить пошаговые значения вектора индикаторов марковской цепи с заданными свойствами и представляет собой формализованную аналитическую модель, способную описывать динамику изменения состояния ПНиИБ (в виде отклонений) МобЦОД. Данная стохастическая разностная модель является развитием известной аналитической модели А. Сегалла в плане механизма определения компенсационных добавок для поиска пошаговых значений индикаторов марковской цепи.

Кроме того, реализуемый с помощью данной модели анализ процессов в пространстве состояний, с учетом шумов возбуждения, позволяет исследовать динамику стохастических процессов функционирования МобЦОД с учетом наличия случайных возмущений (наличия потока отказов и угроз безопасности информации).

Таким образом, помимо сохранения размерности и точности математического описания, разработанная модель обладает новым свойством, важным для описания управляемых про-

цессов функционирования МобЦОД — возможностью формирования выборочных значений моделируемого процесса, что позволяет: унифицировать форму задания всех классов процессов функционирования МобЦОД (дискретных и непрерывных); унифицировать форму представления ПНиИБ МобЦОД, а также унифицировать математические методы анализа и синтеза, что позволит использовать методы теории фильтрации для всех классов моделируемых процессов функционирования МобЦОД (дискретных и непрерывных).

Все это позволяет сделать вывод о целесообразности использования разработанной модели в форме УЦМ-PCY для математического описания стохастического управляемого процесса смены состояний ПНиИБ, имеющих место в рамках функционирования мобильных центров обработки данных.

Литература

1. Концепция развития информационных и телекоммуникационных технологий Вооруженных Сил Российской Федерации на период до 2025 года. — М.: МО РФ, 2015. 16 с.
2. Прохоров А.Н., Рахматуллин С.С. Центры обработки данных. Анализ, тренды, мировой опыт. — М.: ООО «АльянсПринт», 2021. 416 с.
3. Филин С.А., Богомолов В.В., Забелин Я.В. и др. Хрестоматия (Строительство и эксплуатация инженерных систем ЦОД). — М.: ООО «Системс», 2016. 679 с.
4. Паращук И.Б., Михайличенко Н.В. Особенности построения и анализа качества дата-центров как базовых элементов ИТ-инфраструктуры // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы IV Межрегиональной научно-практической конференции. — Севастополь: Севастопольский государственный университет. 2018. С. 28–29.
5. Мобильный модульный центр обработки данных. (2017). [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://piterenergomash.ru/index.php/katalog-produktsii/kontejnerye-resheniya/kontejnerye-tsod>, (дата обращения 14.03.2022).
6. Дмитриев К.А. Discover the Edge: современные решения для задач будущего // Информ-Курьер-Связь. № 3. 2019. С. 58–59.

7. Паращук И.Б., Михайличенко Н.В., Михайличенко А.В. Нейро-нечеткие сети и алгоритмы гранулярных вычислений в задачах интеллектуальной обработки данных для оценки надежности мобильных дата-центров // Применение искусственного интеллекта в информационно-телекоммуникационных системах. Сборник материалов научно-практической конференции. — СПб: ВАС, 2021. С. 110–115.

8. Андреев А.В., Яковлев В.В., Короткая Т.Ю. Теоретические основы надежности технических систем. Учебное пособие. — СПб: Изд. Политехн. ун-та, 2018. 164 с.

9. Казаков И.Е., Артемьев В.М. Оптимизация динамических систем случайной структуры. — М.: Наука, 1980. 384 с.

10. Зейфман А.И., Бенинг В.Е., Соколов И.А. Марковские цепи и модели с непрерывным временем. — М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. 167 с.

11. Терентьев В.М., Паращук И.Б. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи. — СПб: ВАС, 1995. 195 с.

12. Паращук И.Б. Моделирование процесса отклонений показателей качества сети многоканальной радиосвязи от требуемых значений // Радиотехника. 1998. № 11. С. 6–9.

References

1. The concept of development of information and telecommunication technologies of the Armed Forces of the Russian Federation for the period up to 2025. — Moscow: Ministry of Defense of the Russian Federation, 2015. 16 p.

2. Prokhorov A.N., Rakhmatullin S.S. Data processing centers. Analysis, trends, world experience. — Moscow: Alliansprint LLC, 2021. 416 p.

3. Filin S.A., Bogomolov V.V., Zabelin Ya.V. et al. Textbook (Construction and operation of data center engineering systems). — Moscow: LLC «Systems», 2016. 679 p.

4. Parashchuk I.B., Mikhaylichenko N.V. Features of building and analyzing the quality of data centers as basic elements of IT infrastructure // Promising directions of development of domestic information technologies: materials of the IV Interregional scientific and practical conference. — Sevastopol: Sevastopol State University, 2018. P. 28–29.

5. Mobile modular data processing center. (2017). [Electronic resource] Access mode: <http://piterenergomash.ru/index.php/katalog-produktsii/kontejnerye-resheniya/kontejnerye-tsod>, (accessed 14.03.2022).

6. Dmitriev K.A. Discover the Edge: modern solutions for the problems of the future // Informcurrier-Svyaz. 2019. № 3. P. 58–59.

7. Parashchuk I.B., Mikhaylichenko N.V., Mikhaylichenko A.V. Neuro-fuzzy networks and algorithms of granular computing in intelligent data processing tasks for assessing the reliability of mobile data centers // Application of artificial intelligence in information and telecommunication systems. Collection of materials of the scientific and practical conference. — St. Petersburg: VAS, 2021. P. 110–115.

8. Andreev A.V. Yakovlev V.V., Korotkaya T.Yu. Theoretical foundations of reliability of technical systems. Study guide. — St. Petersburg: Ed. Polytech. un-ta, 2018. 164 p.

9. Kazakov I.E., Artemyev V.M. Optimization of dynamical systems of random structure. — M.: Nauka, 1980. 384 p.

10. Zeifman A.I., Bening V.E., Sokolov I.A. Markov chains and models with continuous time. — M.: ELEKS-KM, 2008. 167 p.

11. Terentyev V.M., Parashchuk I.B. Theoretical foundations of multichannel radio communication network management. — St. Petersburg: VAS, 1995. 195 p.

12. Parashchuk I.B. Modeling of the process of deviations of quality indicators of a multichannel radio communication network from the required values // Radio Engineering. 1998. № 11. P. 6–9.