

УДК 004.358:004.65  
DOI 10.17513/snt.40142

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МОДЕРНИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

**Волков В.Ф., Пономарев А.С., Шуваев Н.А.**

*ФГБОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,  
Санкт-Петербург, e-mail: vka@mil.ru*

Целью исследования является минимизация расхода средств, дополнительно привлекаемых для ликвидации этапных опозданий при оптимизации процесса модернизации иерархических систем управления. Предложена методика решения двух взаимосвязанных задач – ситуационной оптимизации структуры иерархической системы управления и многоэтапной оптимизации процесса ее дооснащения средствами защиты информации. Алгоритм решения первой задачи основан на имитационном моделировании прохождения управляющих сигналов, при выборе варианта структуры в качестве показателя оптимизации используется вероятность доведения требуемой информации до исполнительного уровня. Необходимость решения второй задачи обусловлена возможностью срыва планов развертывания модифицированных систем управления вследствие воздействий внешней среды (в основном санкционных воздействий по деятельности ИТ-отрасли). Алгоритм минимизации средств компенсации этапных опозданий основан на создании трехмерного массива комбинаций величин опоздания на текущем этапе и расхода средств на ее ликвидацию на последующих этапах. Количество комбинаций определяется технико-экономическими возможностями заказчика и исполнителя проекта. Просчитанный априори массив (формируется по схеме «от конца к началу») реализуется при выборе варианта устранения опоздания последовательно, от этапа к этапу. Разработанная для сопровождения данного процесса имитационная модель позволяет учитывать возможную реконфигурацию критического пути общего сетевого плана модернизации иерархической системы по исходным данным, соответствующим результатам предыдущих этапов.

**Ключевые слова:** иерархическая система, модельное время, дооснащение, реконфигурация, компенсация опозданий

## APPLICATION OF THE SIMULATION MODELING METHOD IN OPTIMIZING THE PROCESS OF HIERARCHICAL CONTROL SYSTEMS MODIFICATION

**Volkov V.F., Ponomarev A.S., Shuvaev N.A.**

*Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint Petersburg, e-mail: vka@mil.ru*

The purpose of the study is minimizing the expenditure of funds additionally attracted to eliminate unnecessary delays while optimizing the process of hierarchical control system modernization. It is proposed methodology for solving two interrelated tasks – situational optimization of hierarchical management system structure and multi-stage optimization of its retrofitting with information security tools. The algorithm for solving the first task is based on simulation modeling of the control signals passage. When choosing a structure option, the probability of bringing the required information to the executive level is used as an optimization indicator. The need to solve the second task is due to the possibility of plans disruption for the modified control systems deployment due to the external environment impact (mainly due to sanctions in the information technology industry). The algorithm for minimizing the means of compensation for stage delays is based on creating a three-dimensional array of delay values at the current combinations and the expenditure of funds for its elimination at subsequent stages. The quantity of combinations is determined by technical and economic capabilities of the customer and the contractor of the project. A priori calculated array (it is formed according to the scheme from the ends to beginning) is implemented when choosing the option to eliminate delays sequentially from stage to stage. The simulation model developed to support this process allows us to take into account the possible reconfiguration of the critical path of the general network plan for modernization of the hierarchical system based on the initial data corresponding to stages results.

**Keywords:** hierarchical system, model time, equipping, compensation for delays, reconfiguration

### Введение

В настоящее время в различных иерархических системах управления – государственных информационных системах, системах управления транспортной отрасли, управляющих подсистемах силовых ведомств, автоматизированных банковских контролируемых системах, автоматизированных системах управления технологическими производственными процессами – возник-

ла необходимость реконфигурации систем математического обеспечения и дооснащения систем защиты информации. Важность оперативного создания дополнительных программно-аппаратных средств, например систем предупреждения несанкционированного доступа (СПНД), обусловлена продолжающимися санкционными воздействиями и неопределенностью содержания их дальнейшего генерирования (количе-

ство точечных запретов для отечественных IT-организаций превысило второй десяток). Разработка, испытания и развертывание СПНД должны быть осуществлены в кратчайшие сроки, в связи с этим возникает задача оптимизации расхода ресурсов, привлекаемых к обеспечению выполнения вышеупомянутых проектов. Ее решение, в соответствии с принципом декомпозиции, может включать решение двух взаимосвязанных задач – ситуационной оптимизации структуры иерархической системы управления (ИСУ) и многоэтапной оптимизации процесса дооснащения ИСУ. Результаты решения первой задачи являются исходной информацией для решения второй задачи. Вопросы обоснования структуры иерархических систем рассматривались в работе [1] (минимизация количества уровней, оптимизация степени резервирования, расчет характеристик итерационного обмена информацией). Однако алгоритмы координации были разработаны для конкурентной обстановки (задачи Центра и задачи средних и нижних уровней частично не совпадают, в основном из-за необходимости распределения общего ресурса). Рассматриваемые в статье иерархические системы управления созданы и направлены на достижение единой цели, а вопросы координации уже решены на уровне концептуального (внешнего) проектирования, то есть обеспечение решения целевой задачи не требует проведения расчетов по алгоритму Данцига – Вулфа, по алгоритму Корнаи – Липтака и т.п. Следовательно, необходима разработка новой математической модели функционирования ИСУ в условиях вероятностной неопределенности (как при мониторинговом дежурстве, так и в ходе целевого использования). Анализ показал, что процесс информационного обмена в ИСУ адекватно описывается цепями Маркова, однако оперативное перестроение аналитических моделей для условий жестких временных ограничений на ситуационную переработку моделей затруднителен, при этом может иметь место высокая степень эвристичности. Поэтому вместо аналитической необходимо разработать имитационную модель. Процесс создания ИСУ также описывается марковскими моделями [2], что позволяет сформулировать задачу минимизации расхода ресурсов за счет адаптивного реагирования на исход каждого этапа ранних стадий жизненного цикла, при этом должна использоваться частная имитационная модель.

**Целью исследования** является минимизация расхода средств, дополнительно привлекаемых для ликвидации этапных опозданий при оптимизации процесса модерни-

зации иерархических систем управления, и для ее достижения необходимо решить новую научную задачу по разработке обобщенной и частной имитационных моделей функционирования и развертывания ИСУ.

*Применение общей имитационной модели для оценивания результативности подсистем информационного обеспечения.* В общем случае результативность ИСУ оценивается вероятностью  $P_{\text{ису}}$  доведения за заданное время информации, необходимой для каждого отдельного управляемого объекта. Выражения для расчета  $P_{\text{ису}}$  могут быть получены с помощью теорем сложения и умножения вероятностей для конкретной структурной схемы в соответствии с техническим исполнением (радиолиния, кабельная линия, последовательное смешанное соединение, степень резервирования и т.п.). Исходными данными для расчета  $P_{\text{ису}}$  являются количественные оценки интенсивности отказов, параметры внешних воздействий, характеристики окружающей среды, параметры структурно-логических схем для каждого уровня ИСУ, технические характеристики конструктивных элементов и вероятности их безотказной работы. В работах [3, 4] показано, что учет возможных сбоев при прохождении информации от верхнего уровня до нижнего (исполнительского и между уровнями наиболее адекватно описывается дискретными цепями Маркова, однако размерность матриц перехода ИСУ из состояния в состояние резко, непропорционально увеличивается при росте числа объектов в каждом звене. Рабочие алгоритмы использования перечисленных аргументов приведены в руководящих документах и справочниках по надежности электронной техники [4, 5]. Кроме того, следует отметить, что при изменении обстановки и, как следствие, при переходе от исходного облика ИСУ к модифицированному (с сохранением количества уровней) необходимо получение (выведение) новой системы выражений для расчета  $P_{\text{ису}}$ . При этом для каждого нового варианта преобразования исходного облика ИСУ решение такой аналитической задачи потребует дополнительных временных затрат, что создает риск срыва своевременной подготовки предложений в руководящие документы. Для устранения этого недостатка представляется целесообразным применение метода статистических испытаний. Логика его применения заключается в следующем. Разыгрывается прохождение сигналов на первом уровне. При положительном исходе розыгрыша (удовлетворяются вероятностные условия эквивалентности и выполняются временные ограничения, соответствующие

данному уровню) осуществляется переход к следующему уровню ИСУ. При отрицательном исходе данное статистическое испытание считается неудачным, в вычислительном эксперименте организуется новая попытка. При этом предполагается, что для минимизации временной задержки используется ЧЛБ-код и модифицированная криптосистема Мак-Элиса, позволяющая исключить ошибки оператора, контролирующего обратную связь [6].

При имитации временных затрат для иерархических систем, предназначенных для доведения информации до подвижных объектов (ПО), описанная процедура усложняется, так как в сегментах движения модельного времени необходимо учесть возможный уход ПО из зон досягаемости передаваемой информации (географическая недоступность, геофизические факторы, односторонняя блокировка). Закон распределения участков разрыва информационного взаимодействия может быть определен численным методом для конкретных исходных данных (по структуре ИСУ и по обслуживаемым объектам), при этом также проводится дополнительная процедура статистического моделирования.

Для варианта оценивания результативности ИСУ по обобщенному временному показателю  $t_{\Sigma}$  (суммарное (конечное) время доведения требуемой информации) целесообразно предварительное теоретическое обоснование закона распределения величины  $t_{\Sigma}$  с учетом эксплуатационно-технических характеристик конкретного варианта.

Прогнозирование числа обращений  $D$  к датчику случайных чисел в ходе имитации прохождения сигналов является самостоятельной задачей, так как нижняя граница возможных значений  $D$  равна произведению  $N_i * N_{ij} * N_{ijk}$  ( $N_i$  – число уровней,  $N_{ij}$  – число звеньев в уровне,  $N_{ijk}$  – число исполнителей уровней в звене), а верхняя граница является трижды неопределенной случайной величиной. Следовательно, точность расчета  $P_{ису}$  будет определяться шагом заполнения табличного ряда распределения модельного времени.

*Применение частной имитационной модели для оптимизации процесса дооснащения ИСУ.* Для реализации крупных высокотехнологических проектов характерны определенные отставания хода отработки, особенно на первых этапах [7, 8]. Причины нарушения первоначально объявленных сроков и способы «компенсации» опозданий не являются универсальными. Для рассматриваемых в статье иерархических систем управления основными причинами опозданий являются точечные санкцион-

ные воздействия по ИТ-сфере (диапазон за- претов охватывает программное обеспечение, доставку электронно-компонентного оборудования, воздействия на поставщиков и, как следствие, обуславливает временную нехватку специалистов). Компенсация опозданий может быть осуществлена только дополнительными затратами, поэтому возникает актуальная задача поиска вариантов минимизации затрат, зависящих не только от степени нарушения плановых сроков. Анализ работ по управлению инновационными проектами [8] показал, что к настоящему времени в интересах моделирования конкурентной борьбы разработаны различные методики, но все они базируются либо на эконометрическом подходе к составлению и решению систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику двусторонних воздействий по потенциальному конкуренту, либо на применении математической теории игр [7]. В современных условиях фрагментации глобальной экономики указанные подходы неприемлемы, так как исходными данными для проведения расчетов по ним являются неизвестные объем, направленность и периоды санкционных воздействий.

Для решения задачи минимизации затрат представляется целесообразным использовать следующий подход. Обозначим:

$T_{\text{пр}}$  – срок, указанный в проекте дооснащения ИСУ;

$t_{ij}^{(0)}$  – продолжительность работ по установке СПНД для критического пути, рассчитанного при первоначальном формировании плана, то есть

$$\sum_i \sum_j t_{ij}^{(0)} = T_{\text{пр}};$$

$\Delta t_k^{(0)}$  – расчетная продолжительность  $k$ -го этапа критического пути для первоначально запланированной (исходной) структуры общего плана;

$\Delta t_{k\phi}^{(0)}$  – реальное значение этой величины;

$$\Delta t_{k\phi}^{(0)} > \Delta t_k^{(0)}, \quad (1)$$

$P_{\text{пр}}$  – требования заказчика в вероятностной форме.

Так как вследствие задержки (1) имеет место неравенство

$$P(\sum_k \Delta t_{k\phi}^{(0)} \leq T_{\text{пр}}) < P_{\text{пр}}, \quad (2)$$

то возникает риск невыполнения плана дооснащения ИСУ.

Очевидно, на каждом последующем этапе возможно повторение состояния (2). Тогда задача оптимизации процесса дооснащения ИСУ в вербальной постановке заключается в определении вариантов,

минимизирующих суммарные дополнительные расходы

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{k=2}^{K_0} \Delta S^{(k)}.$$

Так как исход каждого этапа и, соответственно, величина компенсации опоздания на следующих этапах является случайными величинами, то минимизацию затрат можно проводить только «в режиме реального времени». Вычислительный процесс должен включать два контура – от конца к началу и, далее, от начала по ходу отработки проекта. Реализация ретроспективной развертки позволит сформировать «базу заготовок» (БЗ), включающую комбинации заранее рассчитанных затрат и величин опоздания для каждого этапа и для каждого варианта критического пути общего сетевого плана. Анализ работ по применению сетевых моделей [3, 7] показывает, что изменение продолжительности участков ранее подготовленного общего плана приводит к необходимости поиска нового критического пути для оставшихся после корректировки этапов.

Таким образом, схема алгоритма минимизации затрат не является детерминированной и заключается в «двойном» подборе управляющих воздействий для каждого факта изменения критического пути и для каждого этапа. Реализация такого рода случайной сети наиболее оперативно может быть осуществлена методом статистического моделирования.

Схема соответствующего вычислительного процесса включает следующие действия. После каждого розыгрыша величины  $\Delta t_{k\phi}^z$  реализуется алгоритм минимизации ( $z$  – номер варианта пересчитываемого критического пути, то есть частотная характеристика действий по реконфигурации общего сетевого плана). Если после очередного статистического испытания устанавливается, что критический путь для оставшихся этапов изменяется, то осуществляется оп-

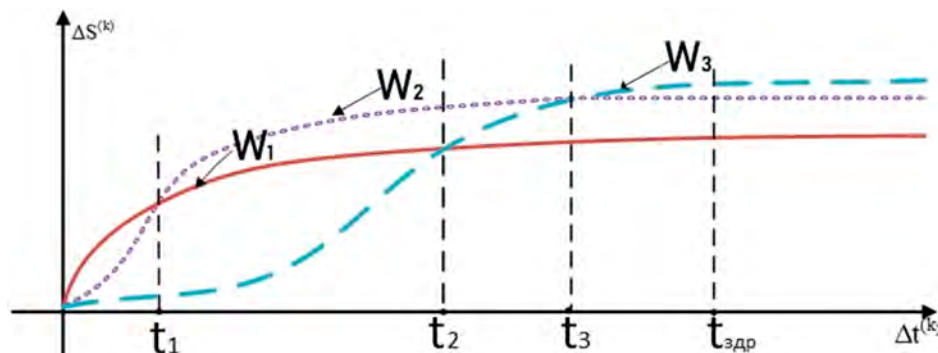
тимизация новой (сокращенной) последовательности этапов. При этом в БЗ вносятся заготовки новых комбинаций, а динамические параметры выражений, описывающих опоздания и затраты, уточняются на каждом этапе путем организации новой ретроспективной развертки. Далее они вносятся в память комплексов средств автоматизации Центра принятия решений (аппарата руководителя проекта).

После розыгрыша всех этапов формируется расширенная БЗ, включающая рекомендации по выбору наиболее целесообразных действий по перепроектированию в каждой ситуации. Следует отметить, что третью координату массива комбинаций в общем случае нельзя рассматривать как детерминированную, так как перебор комбинаций является эвристическим, т.е. необходимо рассчитывать ее некоторое предельное значение, зависящее от назначенных заказчиком доверительной вероятности и доверительного интервала. Далее подсчитывается статистическая оценка риска невыполнения условия:

$$P(\sum_k \Delta t_{k\phi}^{(0)} \leq T_{\text{ГР}}) < P_{\text{ГР}},$$

которое может использоваться при определении нижней оценки вероятности необходимости привлечения дополнительных средств.

Для расчета математического ожидания минимизируемых затрат на каждом шаге ретроспективной развертки, помимо зависимостей, связывающих величину опоздания и величину затрат на компенсацию, необходимо знать закон распределения величины опоздания. Соответствующие зависимости определяются по результатам вычислительных экспериментов; на рисунке предоставлен пример трех вариантов зависимости  $\Delta S^{(k)}$  от  $\Delta t^{(k)}$ . Его анализ показывает, что при опоздании  $\Delta t \leq t_1$  оптимальным вариантом является вариант устранения опоздания  $W_3$ , при опоздании  $t_1 \leq \Delta t \leq t_2$  – вариант  $W_1$ , при опоздании  $t_2 \leq \Delta t \leq t_{\text{здр}}$  – вариант  $W_2$ .



Варианты зависимостей расхода средств на компенсацию опоздания от величины опоздания

Предполагается, что величина  $t_{\text{здр}}$  определяется заказчиком из соображений здравого смысла; например, возможно, что при величине опоздания более  $2/3$  от планового значения продолжительности  $k$ -го этапа потребуется неприемлемый размер затрат на восстановление плановых сроков по оставшимся этапам.

База заготовок, используемая при оптимизации в ретроспективной развертке и выборе оптимального варианта при «прямых» вычислениях, может содержать не менее десяти вариантов таких зависимостей для каждого шага вычислений. Функция распределения продолжительности каждого (точнее, распределения опоздания) определяется по правилам математической статистики. Как правило, она «существует» только в форме таблиц, содержащих десятки тысяч значений. В отличие от рассмотренных в п. 1 данной статьи интервалов, имеющих порядок единиц минут (для вариантов отсутствия разрывов в информационных воздействиях), рассматриваемые интервалы имеют величину десятков не-

дель или месяцев, поэтому представляется целесообразным аппроксимация функции распределения величины опоздания путем ее пересчета в стандартную функцию нормального распределения. Приведем пример преобразования выборки для гамма-распределения. Обозначим через  $F_\gamma(x|p, \lambda)$  и, соответственно, через  $f_\gamma(x|p, \lambda)$  функции гамма-распределения и плотности с параметрами  $p$  и  $\lambda$ , и пусть  $\Phi(x)$  – функция стандартного нормального распределения, а  $\phi(x)$  – его функция плотности. В этом случае приближенно

$$F_\gamma(x|p, \lambda) = \Phi(\lambda u),$$

где  $\lambda u$  – переменная, которая по Вильсону – Хилферти [5] имеет вид

$$\lambda u = 3\sqrt{p} \left[ \sqrt{\frac{\lambda x}{p}} - \frac{9p-1}{9p} \right],$$

а по Фишеру [5] –  $\lambda u = \sqrt{4\lambda x} - \sqrt{4p-1}$ .

После алгебраических преобразований получаем следующие зависимости:

Первый вариант:

$$F_\gamma(x|p, \lambda) = \Phi \left( 3\sqrt{p} \sqrt{\frac{\lambda x}{p}} - \frac{9p-1}{9p} \right) = \Phi(c_1 \sqrt{x} - k_1),$$

где  $c_1 = 3\sqrt{\lambda}$ ;  $k_1 = \frac{9p-1}{9}$ .

Второй вариант:

$$F_\gamma(x|p, \lambda) = \Phi(\sqrt{4\lambda x} - \sqrt{4p-1}) = \Phi(c_2 \sqrt{x} - k_2),$$

где  $c_2 = 2\sqrt{\lambda}$ ,  $k_2 = \sqrt{4p-1}$ .

После интегрирования получаем приближенные функции плотности:

$$\text{вариант 1} - f_\gamma(x|p, \lambda) = \phi(c_1 \sqrt{x} - k_1) 1,5 \sqrt{\frac{\lambda}{x}},$$

$$\text{вариант 2} - f_\gamma(x|p, \lambda) = \phi(c_2 \sqrt{x} - k_2) \sqrt{\frac{\lambda}{x}}.$$

Следует отметить также, что после выявления новых факторов (по отношению к априорной информации) и их анализа возможно изменение основной гипотезы, «заложенной» в соотношение (3). При этом формат зависимости  $\Delta S^{(k)}$  от времени для любого планового периода будет определяться логистическими функциями с другими атрибутивными коэффициентами, соответствующими новой производственно-экономической обстановке.

### Заключение

В статье предложен подход к решению двух взаимосвязанных задач – ситуационной оптимизации структуры иерархической системы управления и многоэтапной оптимизации процесса дооснащения ИСУ. При решении первой задачи результативность ИСУ оценивается по конечному времени доведения требуемой информации. При оценивании временных затрат для

иерархических систем, предназначенных для доведения информации до подвижных объектов, в сегментах имитации модельного времени учитывается возможный уход ПО из зон досягаемости передаваемой информации (географическая недоступность, геофизические факторы, односторонняя блокировка). Закон распределения участков разрыва информационного взаимодействия определяется численным методом для конкретных исходных данных (по структуре ИСУ и по обслуживаемым объектам), при этом проводится дополнительная процедура статистического моделирования. Минимизация расхода средств, дополнительно привлекаемых для ликвидации этапных опозданий, основана на создании и применении в расчетах трехмерного массива комбинаций величин опоздания на контролируемом этапе и расхода средств на ее компенсацию на последующих этапах (горизонт планирования – не более 2 вследствие значительной неопределенности внешней обстановки). Разработанная для сопровождения данного процесса имитационная модель позволяет учитывать возможную реконфигурацию критического пути общего сетевого плана модернизации оптимизационной задачи по исходным данным, соответствующим результатам предыдущих этапов.

Включение предложенных алгоритмов в состав системы математического обеспечения процесса модификации иерархических систем управления позволит обеспечить реализацию планов развертывания ИСУ в кратчайшие сроки. Разработанный методический аппарат целесообразно применять в ходе административно-научного сопровождения хода реализации процесса модификации иерархических систем управ-

ления. Точность оценивания прироста эффективности за счет ситуационной оптимизации будет определяться степенью детализации прогнозных моделей воздействий конкурентной среды.

### Список литературы

1. Велеулов З.А., Кинжагулов И.Ю., Федоров А.В., Фирюлин Д.Р. Надежность изделий и систем: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2023. 184 с.
2. Youssef Ait El Mahjoub, Leo Le Corre, Hind Castel-Taleb Stochastic Modeling And Optimization For Power And Performance Control In DVFS Systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://scs-europe.net/conf/ecms2023/ecms2023-accepted-papers> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.7148/2023-0497.
3. Бирюков Д.Н., Дудкин А.С., Захаров О.О. Способ тестирования средств защиты информации на основе применения многовариантной генерации исходного кода по заданной функциональной спецификации // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. 2022. Вып. 684. С. 113–122.
4. Вивчар Р.М., Птушкин А.И. Имитационное моделирование как инструмент обеспечения риск-ориентированного управления в сложных технических системах // Сборник трудов X Всероссийской НПК по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. СПб.: СПИИРАН, 2022. С. 101–106.
5. ГОСТ Р МЭК 62960-2022. Надежность в технике. Анализ надежности на стадиях жизненного цикла. Дата введения: 01.01.2023.
6. Гордов Н.А. Криптосистемы Мак-Элиса и Нидеррайтера в атаках декодирования классической информации // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 6. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/06/92527> (дата обращения: 15.07.2024).
7. Белов А.С., Добрышин М.М., Горшков А.А., Мазур В.В. Методика определения объема дополнительных средств и ресурсов для устойчивого функционирования корпоративной сети связи в условиях информационно-технических воздействий // Известия Тульского ГУ. Технические науки. 2022. Вып. 9. С. 3–8.
8. Борчин А.С. Проблемы проектного управления в современных IT-компаниях и направления совершенствования управления проектами // Современные технологии управления. 2022. № 1 (97). С. 34–42. DOI 10.24412/2226-9339-2022-197-17.