
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

УДК 681.518: 339.13

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕРЕФЛЕКТОРНЫМИ СИСТЕМАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Димов Э.М., Маслов О.Н.**Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ**E-mail: e.m.dimov@gmail.com*

Рассматривается проблема квазиоптимального управления нерелекторными системами организационно-технического типа с применением статистического имитационного моделирования. Представлены примеры использования многоуровневых систем управления нерелекторными системами в сфере обеспечения корпоративной безопасности и при планировании металлургического производства.

Ключевые слова: нерелекторные системы, квазиоптимальное управление, метод статистического имитационного моделирования, двухступенчатая иерархия управления, обеспечение безопасности, планирование производства.

*Посвящается памяти академика
АН СССР и РАН Моисеева Н.Н.*

Введение

Творческое наследие видного отечественного теоретика в области моделирования и управления сложными системами (СС) Никиты Николаевича Моисеева [1-4] до настоящего времени сохраняет высокую значимость и актуальность. Авторы убедились в этом, анализируя пути применения статистического имитационного моделирования (СИМ) по методу Димова-Маслова (МДМ) в интересах управления СС организационно-технического типа: социально-экономическими, экологическими, специального назначения и т.п. [5-6]. Как известно, задачи из числа сложных экстремальных задач математики удалось применить к решению проблем оптимального управления СС благодаря принципу максимума Л.С. Понтрягина. По мнению Н.Н. Моисеева, этот принцип сыграл выдающуюся роль в создании и развитии математической теории оптимального управления и оптимизационной идеологии, которые «глубоко проникли во все исследования конкретного характера и конструкторские разработки, и, можно сказать без преувеличения, что язык теории оптимальных процессов сделался общим языком современной теории управления» [1].

Однако на пути практического применения принципа максимума возник ряд препятствий, главным из которых является невозможность формализовать поведение (динамику функци-

онирования) подсистем и элементов систем управления (СУ), в состав которых входят лица, принимающие решения (ЛПР), – неотъемлемые компоненты такого рода СУ. Задача разработать для них математические модели, даже с применением современных компьютерных методов и средств вариационного исчисления, теории вероятностей и математической статистики, до настоящего времени не решена.

Кроме того, изменения внешней среды и внутренних условий работы большинства СС и СУ приводят к воздействию на них, наряду с управляющим воздействием, различного рода непредсказуемых (стохастических, случайных по природе) возмущений. Эти возмущения (сигнальные, параметрические, структурные) представляют собой источник неопределенности знаний ЛПР о состоянии СС и СУ. Поэтому условия в задачах оптимального управления всегда являются в известной мере неопределенными (неточными, неадекватными, необъективными), а в ряде случаев – взаимно противоречивыми. В этой связи уместно вспомнить, что, по словам Н. Винера, «приписывать таким неопределенным по самой своей сути величинам какую-то особую точность бесполезно... применение точных формул к этим слишком неточно определяемым величинам есть не что иное, как обман и пустая трата времени» [7]. Суждение Н.Н. Моисеева по этому поводу не менее полемично и парадоксально: «В условиях

неточного определения функции цели ... необходимо и оптимизацию производить с ошибкой» [1]. По нашему мнению, одним из следствий такой «ошибки» является переход от концепции оптимального управления СС к квазиоптимальному.

Мощным средством преодоления неопределенности знаний на этом пути является метод СИМ – в том числе по версии МДМ, которая специально предназначена для квазиоптимального управления СС. Цель статьи – анализ возможности строить иерархические СУ для повышения эффективности функционирования СС наиболее трудного в этом отношении – организационно-технического типа [8-11].

Рефлекторные и нерелекторные СС

Н.Н. Моисеев, с которым одному из авторов статьи посчастливилось обсуждать эти вопросы, на основе описания поведения СС в виде

$$\frac{dx}{dt} = f(x; u; t; \xi), \quad (1)$$

где $x(x_1; x_2 \dots x_n; t)$ – вектор координат состояния СС, являющейся объектом управления, в n -мерном фазовом пространстве; $u(u_1; u_2 \dots u_n; t)$ – вектор, отражающий координаты управляющего воздействия на СС, $f(x_1; x_2 \dots x_n; u_1; u_2 \dots u_n; t; \xi)$ – функционал качества работы СС; t – текущее время; ξ – случайное возмущение, также «управляющее» СС, предложил разделить их на две группы: иерархические СС технического типа, которые он назвал рефлекторными, и нерелекторные СС – социально-экономические, эколого-эргономические, медицинские и т.п. [1]. Это разделение, как показал опыт развития СУ, также имеет глубокий смысл: поскольку реакция рефлекторных СС на возмущение ξ является однозначной и изучение процессов управления ими может сводиться к задачам оптимизации на основе принципа максимума без учета особенностей поведения звеньев (подсистем, элементов), входящих в состав СС первой группы.

Изучение нерелекторных СС, напротив, требует от ЛПР введения гипотез относительно поведения указанных подсистем и элементов: поскольку они способны самостоятельно максимизировать свои функционалы качества $f(x; u; t; \xi)$ при воздействии возмущений ξ (например, вследствие делегирования полномочий «сверху – вниз» при децентрализованном управлении СС), что ведет к конфликтным ситуациям и невозможности использовать принцип максимума

при управлении ими. Иерархичность и нерелекторность возникают в СС, относящихся ко второй группе, естественным путем – по мере роста, развития и усложнения любой простой системы.

Если управление K звеньями в иерархической СС осуществляется по информации о состоянии этих звеньев, то есть $u_i(t) = u_i(x_i; t)$; $i [1; K]$, можно записать управляющее воздействие на СС в матричном виде как

$$U(t) = B(t) u(t); \quad (2)$$

где $B(t)$ – блочно-диагональная матрица, подматрицы которой соответствуют подсистемам СС и подматрицам, входящим в состав $u(t)$. В рефлекторных СС матрица $B(t)$ распадается (декомпозируется) на подматрицы $b_i(t)$, выбор для которых оптимальных управлений $u_i(t)$ ведет к оптимизации процесса управления СС в целом. В нерелекторных СС матрица $B(t)$ не является блочно-диагональной, поэтому однозначно предсказать реакцию СС на ξ и аналогичным образом реализовать процесс управления не удается.

Однако, рассматривая $f(x; u; t; \xi)$ как цель управления СС, о поиске минимального значения функционала пути к этой цели можно говорить всегда. При этом случайное возмущение ξ можно рассматривать как фактор неопределенности знаний ЛПР [1; 8], которая осложняет его действия – ввиду отсутствия необходимой информации, присутствия помех, наличия нескольких целей и неясности намерений самого ЛПР, а также противодействия ему со стороны конкурента или злоумышленника, отсутствия согласованного взаимодействия с партнерами. Напомним, что знания ЛПР могут быть как верифицированными, так и аксиологическими [12] – в последнем случае наибольший интерес при организации управления нерелекторными СС представляют гипотезы поведения звеньев, которые выдвигают ЛПР в процессе принятия решений.

В зависимости от характера данных гипотез формулируются соответствующие им математические задачи, важнейшими из которых являются:

– игра с противоположными интересами – антагонистическая игра Дж. фон Неймана [13] (например, в условиях конкуренции и рыночной борьбы корпораций), где выигрыш одного из игроков означает проигрыш другого, обмен информацией между ними невозможен и т.д.;

– игра с непротивоположными интересами Ю.Б. Гермейера [14] – возникающая в условиях партнерства и сотрудничества ЛПР при достижении общих целей, когда обмен информацией не

только возможен, но и целесообразен, действия ЛПР имеют согласованный системный характер и т.п.

Условия так называемой «цифровой экономики», да и вообще реалии рыночной жизни XXI века, показывают, что развитие наиболее перспективных научных теорий: вероятностей, риска, игр, ожидаемой полезности и т.п. – не может идти по традиционному пути доказательства теорем и лемм, необходимых в основном для доказательства их последующих аналогов. В этой связи актуальные высказывания Н.Н. Моисеева почти полувековой давности звучат как своего рода пророчества. «Постепенно начинает возникать понимание того факта, что математика не так уж существенно отличается от других естественных наук и, во всяком случае, имеет такое же эмпирическое начало. После работ Геделя, изобретения ЭВМ и опыта работы математиков в прикладных областях этот тезис становится все более распространенным. Как и любое другое знание, любая другая наука, математика нужна человеку для решения определенных практических задач, достижения определенных целей. И каждый раз требования к этим знаниям, к анализу должны находиться в определенном соответствии с этими целями» [1].

Отметим, что нерелекторные СС (корпорации, компании, фирмы) сегодня часто относят к системам холонического типа, где структурными единицами являются холоны (предприятия, цеха, филиалы корпорации, то есть подсистемы и звенья СС), которые обладают свойством самоорганизации и наделены правом самостоятельно принимать управленческие решения, а элементы таких СС (в том числе ЛПР и другие сотрудники) именуют акторами [12]. Холоны, относящиеся к разным уровням (стратам, слоям) иерархической СС, взаимодействуют с холонами верхнего и нижнего уровней, они способны принимать, обрабатывать и передавать дальше информационные и материальные потоки, команды, разного рода воздействия и т.д. Развитие методов и средств управления холоническими СС в настоящее время представляется важной научно-технологической задачей.

Применительно к нерелекторным СС Н.Н. Моисеевым были выдвинуты две идеи: первая идея о необходимости при разработке СУ для иерархических и многокритериальных СС каждый раз конкретизировать понятие оптимальности управления, чтобы «вложить разумный смысл в понятие оптимальности». Вторая идея сводится

к предложению использовать для управления нерелекторными СС иерархические СУ.

Иерархические СУ для нерелекторных СС

Целью введения иерархии в СУ является распределение между ее звеньями функций обработки информации и принятие рациональных решений по выбору управлений $u_i(t)$. При этом, с одной стороны, существует угроза сужения множества допустимых управлений $u \in U$ ввиду дополнительных ограничений и усложнения технологии управления, с другой стороны – приходится считаться с тем, что «без разделения функций принятия решений система вообще не сможет функционировать» [1]. Важным фактором при этом является связь между критерием качества работы СУ и требованиями к алгоритмам обработки информации: поскольку рост объемов информации ведет к необходимости «распараллелить» процессы ее сбора и обработки, что требует создания в составе СУ самостоятельных информационных подсистем, а вследствие этого – децентрализации всего процесса принятия управленческих решений.

Поскольку при децентрализованном принятии решений звеньям СУ нужны существенно меньшие объемы информации, которые можно обработать быстрее, качественнее и в условиях меньшей неопределенности, это способствует повышению эффективности управления – но одновременно означает формирование в СУ иерархической структуры. Децентрализация управления становится источником новой неопределенности: связанной с тем, что у звеньев и подсистем СУ появляются собственные цели, потенциально не тождественные друг другу и интересам системы в целом, что характерно для нерелекторных СС. Поэтому возникает необходимость говорить и об оптимальной мере централизации и децентрализации при управлении СС, и об оптимальном и регулируемом распределении функций управления между звеньями и уровнями СУ.

Математическая задача в рассматриваемой ситуации соответствует игре Гермейера с противоположными интересами, где центр может управлять игроками как при помощи обязательных для исполнения команд, так и более «демократичными» способами: распределяя между ними ресурсы по своему усмотрению, используя систему штрафов и поощрений, ограничивая и расширяя права отдельных звеньев и т.д.

Примером двухступенчатой иерархической СУ является система «центр» – «производители»

(далее без кавычек), где число последних равно N . Роль центра может выполнять корпорация, роль отдельного производителя – n -ое предприятие, входящее в ее состав, $n \in [1; N]$. Здесь налицо два игрока: центр и производитель, которые, во-первых, преследуют разные цели (хотя и неантагонистического характера), а во-вторых, неравноправны в правилах игры, поскольку центр имеет право первого хода.

Его задача: распределять ресурсы, вводить штрафы и поощрения, ограничивать активность производителей путем введения квот и тарифов, регулирования цен и т.д. таким образом, чтобы максимизировать общий доход:

$$Q_N = Q[P_1; P_2; \dots; P_N; w_1(P_1); w_2(P_2); \dots; w_N(P_N)], \quad (3)$$

где P_n и $w_n(P_n)$ – соответственно, объем реализованной продукции и поощрение (штраф) для n -го производителя.

В начальный момент игры центр сообщает производителям ее правила: плановые значения $P_n(0)$; условия получения $w_n(P_n)$ и т.д., после чего каждый производитель предпринимает усилия, чтобы максимизировать свой предполагаемый доход: $Q_n = Q(P_n) = \text{MAX}$, а центр регулирует их работу при помощи $w_n(P_n)$ таким образом, чтобы выполнилось условие (3). В итоге реальный доход n -го производителя равняется

$$Q_n = Q[P_n; w_n(P_n)], \quad (4)$$

и сложится ли по максимуму общий доход корпорации из доходов N предприятий, соответствующих (4), то есть выполнится ли условие

$$Q_N = \sum_{n=1}^N Q_n = \text{MAX}, \quad (5)$$

зависит как от активности производителей, так и от эффективности управления ими со стороны центра.

Поскольку в игре Гермейера конкуренция отсутствует, каждый из производителей заинтересован в том, чтобы центр успешно справился со своей задачей и условие (5) было достигнуто. Поэтому информация о темпах и результатах их текущей деятельности, уходящая «наверх», должна быть максимально полной и достоверной, а возможные штрафы не следует воспринимать как наказание.

На всех этапах функционирования подсистем и элементов рассматриваемой СС: от составления и согласования планов каждого из N производителей с центром до совместных действий по сбыту продукции на рынке, их деятельность должна

быть скоординирована и оптимизирована в конкретном «разумном смысле» – чтобы обеспечить выполнение (5). При этом вполне уместно, на наш взгляд, говорить о переходе от оптимального управления СС к квазиоптимальному.

Квазиоптимальное управления СС

Идею квазиоптимального управления иллюстрирует рис. 1, где в графическом виде показана эффективность $\mathcal{E}(X)$ функционирования СС в зависимости от обобщенного аргумента X (функционала качества, многомерного показателя, многофакторного критерия и т.п.), определяющего эту эффективность. Теория оптимального управления ориентирует ЛПР на определение математическими методами максимально возможного значения эффективности \mathcal{E}_{opt} , соответствующего варианту « O » (далее без кавычек) и значению аргумента X_{opt} – если такой вариант существует в природе, что оговаривается специально.

На отведенном ЛПР для принятия решения отрезке времени $t \in [0; T]$, таким образом, строго говоря, он должен не только определить значения \mathcal{E}_{opt} и X_{opt} , но и доказать, что найденный им вариант O действительно является оптимальным и лучшего варианта в настоящий момент быть не может.

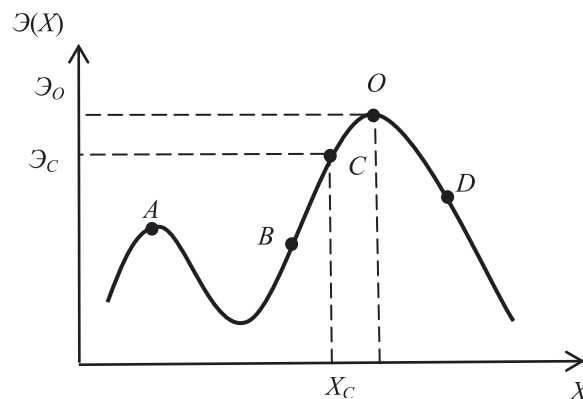


Рис.1. К выбору квазиоптимального варианта решения

С точки зрения практики, это выходит за рамки здравого смысла, если доступными для ЛПР являются варианты A ; B ; C и D , так что выбор наилучшего возможен только из их числа. Если $\mathcal{E}_C > \mathcal{E}_{A;B;D}$, то значения \mathcal{E}_C и X_C для него окажутся наилучшими и вариант управления C для него будет оптимальным – хотя субъективность данного выбора очевидна, поскольку объективно лучшим является вариант O .

Но переход от оптимального управления СС второй группы к квазиоптимальному управлению

требует пересмотра принципов разработки СУ и отказа не только от фундаментального принципа максимума Понтрягина, но и от идеологии моделирования СС на основе вариационного исчисления и теории дифференциальных уравнений в целом. В этой связи вновь обратимся к [1], где Н.Н. Моисеев рассматривал два перспективных пути проведения исследований:

– изучение модельных задач с целью понимания (интуитивного, а затем все более осознанного) принципов, призванных составить фундамент информационной теории иерархических систем, включающей широкий круг конкретных вопросов: от моделирования структуры штрафов и поощрений $w_n(P_n)$, $n \in [1; M]$, $N \gg 1$, до аппроксимации нерелекторных СС рефлекторными;

– использование имитационных систем (simulation systems), каждая из которых является наукоемким программным продуктом и состоит из системы моделей, описывающих эволюцию изучаемого объекта; системы процедур, позволяющей объединить эти модели с ЛПР в диалоговом режиме; и специального математического обеспечения (в виде системы компьютерных языков и алгоритмов), необходимого для ее функционирования.

Добавим, что представляют существенный интерес три частных замечания [1]: первое касается «гипотез поведения» звеньев СУ, моделируемых с помощью «черного ящика», где функция выхода определяется не только входным воздействием, как это принято школой Форрестера-Медоуза, но и внутренним состоянием рассматриваемой СС (по нынешней терминологии, это актуальная модель «серого ящика»).

Второе замечание относится к процедуре разработки компромиссных коллективных решений в игре Гермейера с участием N производителей: решение считается наиболее эффективным (квазиоптимальным), если не существует никакого другого решения, которое было бы «лучшим» для любого из игроков, и устойчивым (равновесным), если отступление от него невыгодно прежде всего самому игроку-отступнику. В теории игр известна теорема о том, что в принципе «состояния равновесия существуют и они эффективны», однако реальность все же такова, что эффективные решения зачастую неустойчивы, а устойчивые решения неэффективны.

Третье замечание, на первый взгляд, имеет косвенное отношение к управлению СС, однако представляется важным, поскольку также связано с выбором методов и средств для оценки

управленческих действий – не так удобных и практичных в плане сервиса ЛПР, как максимально эффективных с точки зрения достижения поставленной цели. «Студент, окончивший математический факультет, глубоко убежден в том, что сходящийся алгоритм – это хороший алгоритм, а расходящийся – плохой. А, строго говоря, свойство сходимости алгоритма в общем случае не является ни необходимым, ни достаточным для того, чтобы его можно было рекомендовать для окончательной оценки алгоритма. Существует много примеров, когда реализация сложных вычислений была осуществлена с помощью заведомо расходящихся алгоритмов, и, наоборот, устойчивые сходящиеся алгоритмы приводили уже на одной из первых итераций к машинной бесконечности» [1]. Иллюстрацией развития этой мысли является предложение использовать для оценки эффективности новых СС комплексный критерий в виде функционала ожидаемой полезности (ФОП).

Функционал ожидаемой полезности

Проблема выбора квазиоптимальных решений в процессе проектирования СС непосредственным образом связана применением СИМ по МДМ, методов сценариев и функционально-стоимостного анализа, а также с теорией ожидаемой полезности СС. Пусть ЛПР рассматривает K вариантов своих действий (сценариев развития событий), направленных на достижение указанной цели как некоего важного для него позитивного эффекта (выигрыша) F_k , который может быть лично достигнут с вероятностью P_F при затратах, равных G_k , которые могут быть лично им обеспечены с вероятностью P_G .

Значение P_F также учитывает меру правильности прогноза получить на выходе проекта по k -му сценарию выигрыш F_k , а значение P_G – шансы ЛПР собрать ресурс G_k , необходимый для выполнения проекта. ЛПР также учитывает, что k -ый сценарий приводит к достижению цели с вероятностью $P_{k'}$, которая характеризует некие объективные (зависящие не только от него лично, как внешние, так и внутренние) обстоятельства: например, в виде согласования и утверждения проекта в вышестоящих инстанциях и т.п. Тогда в качестве критерия эффективности k -го сценария ЛПР может быть выбрана расчетная величина

$$Q_k = p_k (p_F F_k - p_G G_k), \quad (6)$$

где $k \in [1; K]$, которая и является для него мерой полезности рассматриваемого проекта [20-21]. По-

нимая под F_k предполагаемый «доход», а под G_k – «расходы», связанные с реализацией k -го сценария, следуя логике и терминологии фон Неймана – Моргенштерна и Сэвиджа, Q_k можно именовать ФОП, который в данном случае является случайной величиной – поскольку в его состав входят вероятности P_k ; P_F и P_G .

Простой по составу («доходы» минус «расходы»), ФОП (6) отличается достаточно сложной комплексной (объективной и субъективной, детерминированной и стохастической, статической и динамической и т.д.) структурой, где ключевым элементом является G_k – так как при отсутствии необходимых ресурсов о его реализации речи быть не может. При анализе ФОП необходимо промоделировать связи между G_k и P_G – на предмет того, есть ли возможность собрать нужные ресурсы; G_k и F_k – поскольку ЛПП надо знать, «стоит ли игра

свеч»: для этого можно рассмотреть соответствующий параметрам G_0 и F_0 «эталонный» сценарий, относительно которого будет реализована стратегия «синтеза через анализ» СС при помощи СИМ по МДМ; G_k и P_G – так как, не собрав ресурсы и не имея под них гарантий, нельзя начинать проект; G_k и P_k – в силу того, что получить утверждение плана действий ЛПП в надсистеме без необходимых ресурсов тоже вряд ли возможно; F_k и P_k – поскольку указанное разрешение «сверху» без весомого стимула в виде реальной возможности выигрыша F_k также обеспечить трудно; P_k и P_G ; P_F – если считать, что вероятность начала проекта обусловлена перспективой получения необходимых ресурсов и возможностью достижения цели в виде выигрыша F_k .

Схема выбора квазиоптимального сценария по критерию $Q_{opt} = MAX(Q_k)$ показана на рис. 2.

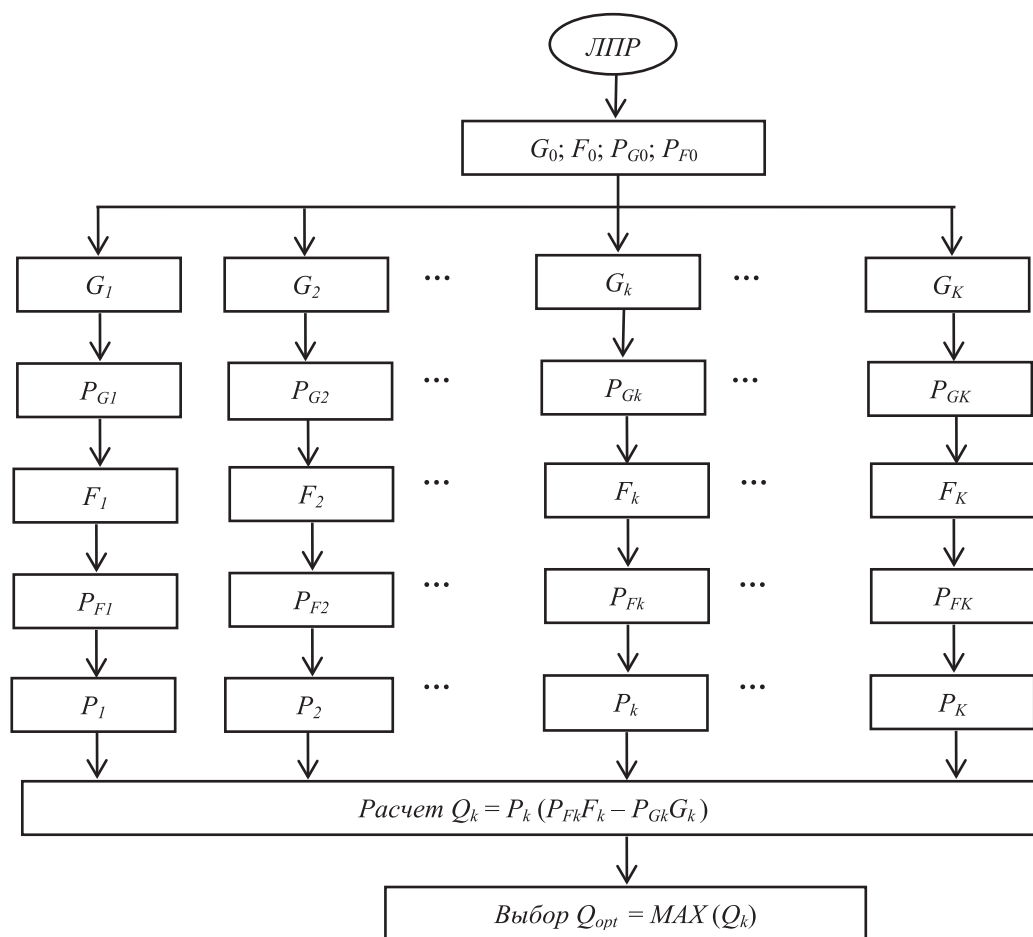


Рис. 2. К выбору квазиоптимального сценария действий ЛПП по критерию ФОП [20]

Объективную сторону процесса формирования ФОП отражают его компоненты G_k и P_G , поскольку объем необходимых ресурсов и вероятность их получения ЛПП способны достаточно точно спрогнозировать функционально-стоимостным

методом (эти вполне реальные величины в первом приближении можно считать детерминированными). В отличие от них F_k , P_F и P_k – это виртуальные стохастические величины, отражающие субъективную сущность ФОП, которая связана

с неопределенностью знаний ЛПР о свойствах будущей СС и может быть устранена или уменьшена до приемлемых пределов лишь с помощью эвристических (экспертных) методов.

Отметим, что теоремы классической теории вероятностей в рамках концепции «риск как неопределенность» Лапласа-Колмогорова мало подходят к рассматриваемой ситуации, где более продуктивной является концепция «риск как возможность» Бернулли-Сэвиджа. В то же время теоретической основой и своего рода инструкцией по применению ФОП является суждение Н.Н. Моисеева о комплексном подходе к разработке новых СС. «Когда речь идет о любой реальной системе: технической, экономической, военной, – то процесс ее проектирования никогда не может быть четко сформулирован и сведен к решению какой-либо одной задачи или даже цепочки математических задач. Противоречивость требований к конструкции и наличие ряда других неопределенностей, с которыми неизбежно сталкивается человек, проектирующий систему, приводит к тому, что неформальный анализ, поиск компромисса занимает значительное место в процессе проектирования. В результате именно такого неформального анализа в проектировании и удастся эффективно использовать оптимизационные методы (как некоторый вспомогательный элемент), дающие предельные оценки конструкции» [1]. Варианты моделирования и результаты исследования ФОП представлены в [20-22].

Иерархические СУ для обеспечения информационной безопасности

Предложения по созданию сложных по структуре СУ, в состав которых входят СИМ-модели, возникли в рамках развития кибернетического подхода к описанию и изучению свойств СС [15-16]. Сегодня они нашли широкое применение, к примеру в СС специального назначения, где иерархия их подсистем и элементов соответствует уровням подчиненности командных структур и штабов [17]. Важное значение имеет ряд новых применений многоуровневых СУ: для управления корпоративной безопасностью, организации обмена научно-технической информацией (НТИ), реализации инновационных проектов и т.п. Поскольку все они связаны между собой, рассмотрим ситуацию в области обмена НТИ при проведении инновационных исследований с учетом обеспечения требований информационной безопасности [18].

Необходимо исходить из того, что инновационные разработки требуют организации оператив-

ного обмена НТИ, где основными процессами являются диалог между ЛПР, взаимные посещения, выступления, обмен письмами и публикациями, редакционно-издательская работа и т.д. – все, что принято называть научной коммуникацией. Эта коммуникация может быть формальной и неформальной; устной и письменной; межличностной и безличной; непосредственной и опосредованной; планируемой и спонтанной.

В СУ, выполненной по иерархической схеме, центр призван жестко контролировать прежде всего процессы формального обмена НТИ, где ведущее место принадлежит редакционно-издательской и библиотечно-библиографической деятельности, распространению публикаций (включая адресную рассылку и книготорговлю), архивному делу. На данном верхнем уровне сбором, переработкой, хранением, поиском и распространением НТИ занимаются специализированные учреждения и организации: научно-технические библиотеки, издательства и органы НТИ. Достоинства формальной коммуникации обусловлены публикацией документов, которые становятся носителями НТИ практически постоянного хранения; контролем достоверности и ценности передаваемой информации; распространением ее через сеть специализированных учреждений. Недостатки состоят в том, что формальные коммуникации затянута по времени, инерционны и «бюрократизированы».

На нижнем втором уровне СУ участники игры (тип которой сразу определить трудно) осуществляют неформальный обмен НТИ путем личного общения при непосредственных контактах (межличностная коммуникация) или переписки (безличная коммуникация). Достоинства неформальной коммуникации – оперативность; высокая избирательность и адресность; эффективность оценки; быстрота обратной связи. Передаваемая по неформальным каналам НТИ содержит внутренний подтекст, эмоциональную окраску – поэтому при контактах и научных спорах генерация новых идей проходит активнее, чем при усвоении и переработке других материалов. Недостатки связаны с отсутствием механизма контроля качества и ценности НТИ, средств регистрации и длительного хранения, ограниченностью сферы распространения.

С точки зрения теории игр, существенное значение здесь имеет разделение НТИ на открытую и конфиденциальную информацию (КИ). Любая корпорация заинтересована в том, чтобы при обмене НТИ получить как можно больше КИ от своих партнеров и конкурентов и одновременно

предоставить им как можно меньше своей КИ – что свойственно антагонистической игре фон Неймана. Соблюдая баланс взаимных интересов, ЛПР в то же время не могут прибегать к дезинформации и промышленному шпионажу – поскольку раскрытый обман будет невыгоден им самим, – что присуще игре Гермейера. В итоге создается достаточно сложная и неоднозначная ситуация, в которой действия обеих уровней СУ должны быть гармонизированы: центр не в состоянии всех «держать и не пущать», играя по фон Нейману, поскольку тогда инновационный процесс остановится, а участники игры по Гермейеру должны корпоративные интересы все же ставить выше любых других. В отношении роли и места, которое СИМ по МДМ, метод сценариев, теории управления и ожидаемой полезности занимают в этом процессе, пока можно сказать, что они являются чрезвычайно важными.

Отметим также, что документы на бумажных носителях сегодня уступают по доступности информационным СС, основу которых составляют онлайн-базы данных (БД): Internet-серверы на основе Web-сайтов; Consumer Online Market – системы, рассчитанные на массового потребителя, и профессиональные БД – мощные СС с высокоэффективным поисковым аппаратом, ежедневным обновлением и круглосуточным доступом. С учетом того, что нелегальный рынок имеет доступ практически ко всем указанным БД, разработка иерархических СУ для эффективного обмена НТИ и обеспечения информационной безопасности бизнеса представляет собой актуальную научно-технологическую задачу.

Управление производством с применением СИМ по МДМ

Укажем на пример реального использования СИМ-моделей в иерархической СУ процессом производства и обработки алюминиевых сплавов в авиационной промышленности [9-11]. Надсистемой на уровне предприятия здесь является отраслевая СУ, где функционирует моделирующий центр, предназначенный для поддержки действий ЛПР верхнего уровня, возглавляющих процессы планирования бизнеса, стратегического и оперативного управления N производителями в рамках игры Гермейера. Несмотря на то, что отраслевая СУ обладает мощными ЭВМ и развернутым программным обеспечением, она не способна обеспечить эффективное управление каждым из N игроков, производительность и экономические показатели которого определяются целым рядом «индивидуальных» стохастических возмущений

ξ_n (несвоевременность поступления сырья и ресурсов; отклонения от технологии производства; остановки и простои оборудования; наличие внеочередных директивных заказов; ошибки в работе персонала и т.д.). Трудности управления данной СС определяют также присущие ей свойства – множество режимов работы при малом разнообразии оборудования; многообразие маршрутов металлопотока; неравномерная загрузка оборудования; большая номенклатура и мелкосерийность выпускаемых изделий; необходимость корректировки планов ввиду влияния возмущений и т.п.

Основой для надсистемы СУ является директивный выпуск изделий (портфель заказов) на конкретный плановый период (год, квартал, месяц). Цель СУ на уровне предприятия – планирование и регулирование производства путем эффективных действий ЛПР, для чего предусмотрено их взаимодействие с СИМ-моделью и другими элементами СУ в диалоговом режиме. Получив директивный план, СУ предприятия при помощи СИМ-модели производит оценку возможности его выполнения по всем номенклатурным позициям. В случае отрицательного результата (когда вероятность невыполнения плана по отдельным позициям ниже установленного критерия) ЛПР также с помощью СИМ-модели ищет выход из ситуации. Руководствуясь данными за предыдущий период и собственным опытом, он производит перераспределение позиций плана и вновь производит его оценку – до тех пор, пока не остановится на предпочтительном (квазиоптимальном) варианте. О найденном решении ЛПР информирует центр, за которым сохраняется право окончательного выбора.

После согласования предложенного решения центром (при отсутствии центра необходима договоренность с другими $N - 1$ игроками) на предприятии разрабатывается план производства (также при помощи СИМ-модели) и устанавливается последовательность запуска изделий с учетом размеров выпускаемых партий, приоритетов номенклатурных позиций, наличия директивных указаний, состояния оборудования, графика поступления ресурсов и т.д. Решение комплекса указанных задач в диалоговом режиме между ЛПР и ЭВМ обеспечивает достижение конечной цели – выбор наилучшего варианта запуска изделий в производство.

Отметим, что процесс планирования полностью соответствует схеме на рис. 1 – поскольку, во-первых, здесь также необходимо при помощи метода сценариев и метода функционально-стоимостного анализа разработать для рассматри-

ваемой СС конкретные варианты *A*; *B*; *C* и *D*. Во-вторых, с применением СИМ-модели следует выбрать из них наилучший в данный момент времени вариант – чтобы СУ могла соответствующим образом скорректировать состояние объекта. Сопровождающие квазиоптимальное управление вычислительные задачи (в отличие от задач оптимального управления) не отличаются сложностью, их решение возможно в автоматизированном режиме, с применением стандартных пакетов программ. «Центр тяжести» усилий ЛПР из области прикладной математики переносится в сферу профессиональных интересов и компетенций – что самым положительным образом сказывается на эффективности их труда.

Выводы

Рефлекторные СС представляют важный класс иерархических систем, исследование которых возможно с помощью методов теории оптимального управления, краеугольным камнем которой является принцип максимума Л.С. Понтрягина. По мысли Н.Н. Моисеева, введение гипотез поведения звеньев нерелекторных СС позволяет в ряде случаев изучать нерелекторные СС и управлять ими по аналогии с рефлекторными, вкладывая специально оговоренный смысл в понятие оптимальности. В то же время гипотеза не является объективным законом – это предположение, которое соотносится с субъективными аксиологическими знаниями и представлениями ЛПР о том, как могут действовать звенья в составе СУ. Определение целевых функций этих звеньев (подсистем и элементов) является наиболее трудной проблемой для иерархических СУ. Пути ее решения могут быть связаны с поиском гомеостаза («равновесия» СС в условиях воздействия случайных факторов), а также анализом реакции звеньев СУ на управляющие действия центра и достижением компромисса между целями СУ и ее звеньев, построением динамического адаптационного механизма для управления нерелекторными СС. Мощным средством информационно-технологической поддержки иерархических СУ для нерелекторных СС является метод СИМ по версии МДМ.

Литература

1. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1975. – 528 с.
2. Моисеев Н.Н. Человек, среда, общество. Проблемы формализованного описания. М.: Наука, 1982. – 240 с.
3. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. – 302 с.
4. Лотов А.В., Моисеев Н.Н., Петров А.А. Некоторые вопросы моделирования программного метода управления социально-экономической системой // Модели и алгоритмы программного метода планирования сложных систем. М.: Изд. ВЦ АН СССР, 1979. – С. 4-10.
5. Димов Э.М., Маслов О.Н., Пчеляков С.Н. и др. Новые информационные технологии: подготовка кадров и обучение персонала. Часть 2. Имитационное моделирование и управление бизнес-процессами в инфокоммуникациях. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 350 с.
6. Ануфриев Д.П., Димов Э.М., Маслов О.Н. и др. Статистическое имитационное моделирование и управление бизнес-процессами в социально-экономических системах. Астрахань: Изд-во АстИСИ, 2015. – 366 с.
7. Винер Н. Творец и робот. Пер. с англ. М.: Прогресс, 1996. – 104 с.
8. Димов Э.М., Маслов О.Н., Трошин Ю.В. Снижение неопределенности выбора управленческих решений с помощью метода статистического имитационного моделирования // Информационные технологии. №6, 2014. – С. 51-57.
9. Димов Э.М. Оптимальное управление комплексным производством дискретно-непрерывного типа на основе имитационного моделирования // Опыт применения прикладных методов математики и вычислительной техники в народном хозяйстве. М.: Статистика, 1975. – С. 58-73.
10. Борисов А.С., Голенко Д.И., Димов Э.М. и др. Имитационное моделирование производственных систем дискретно-непрерывного типа // Проблемы случайного поиска. АН Латв. ССР. Вып. 5. Рига: Зинатне, 1976. – С. 197-229.
11. Димов Э.М. Имитационное моделирование производственной системы дискретно-непрерывного типа // Математическая и техническая кибернетика. АН Груз. ССР. Тбилиси: Мецниереба, 1977. – С. 114-125.
12. Виттих В.А. Организация сложных систем. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2010. – 64 с.
13. Нейман Дж. фон, Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. Пер. с англ. М.: Наука, 1970. – 708 с.
14. Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами. М.: Наука, 1976. – 327 с.
15. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.

16. Алгазинов Э.К., Сирота А.А. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем. М.: Изд-во Диалог-МИ-ФИ, 2009. – 416 с.
17. Основы теории управления в системах специального назначения. М.: Изд. УДП РФ, 2008. – 400 с.
18. Маслов О.Н. Безопасность корпорации: моделирование и прогнозирование внутренних угроз методом риска. Самара: Изд-во ПГУТИ-АЭРОПРИНТ, 2013. – 170 с.
19. Шумейкер П. Модель ожидаемой полезности: разновидности, подходы, результаты и пределы возможностей. Пер. с англ. // THESIS. Вып. 5, 1994. – С. 29-80.
20. Маслов О.Н., Фролова М.А. Функционал ожидаемой полезности: принципы моделирования и практического применения // Инфокоммуникационные технологии. Т.13, №3, 2015. – С. 291-297. doi: 10.18469/ikt.2015.13.3.09.
21. Маслов О.Н., Фролова М.А. Функционал ожидаемой полезности в задачах управления сложными системами организационно-технического типа // Инфокоммуникационные технологии. Т.14, №2, 2016. – С. 168-178. doi: 10.18469/ikt.2016.14.2.09.
22. Маслов О.Н., Фролова М.А. Анализ проекта системы технической защиты информации с применением функционала ожидаемой полезности // Защита информации. Инсайд. №2, 2017. – С. 68-72.

Получено 18.05.2017

ПРИЛОЖЕНИЕ

У ИСТОКОВ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕРЕФЛЕКТОРНЫМИ СИСТЕМАМИ

Димов Э.М.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: e.m.dimov@gmail.com

В июле 1979 года я был преисполнен энергии и энтузиазма по двум причинам: положительно решался вопрос о выезде в Африку для преподавания в зарубежном университете и в Куйбышевском плановом институте была фактически завершена работа над докторской диссертацией «Человеко-машинная оптимизация управления металлургическим производством с применением имитационного моделирования». Оставалось найти трех официальных оппонентов, но дело застопорилось: в Куйбышеве нужных людей не было, а к кому обратиться в Москве, я не знал. Поэтому раздобыл служебный телефон главного специалиста в этой области: заместителя директора Вычислительного центра, действительного члена АН СССР Никиты Николаевича Моисеева – и поехал к нему в столицу. Прибыл утром, в субботу, на Казанский вокзал, набрал номер, особо на успех не надеясь, и вдруг услышал в трубке тихий доброжелательный голос: «Моисеев слушает». Тут от волнения у меня пересохло горло, и я не мог сразу объяснить причину звонка в столь раннее, субботнее, скорее всего нерабочее, время. Потом взял себя в руки и достаточно сбивчиво объяснил ситуацию, назвал тему диссертации – академик выслушал, не пере-

бивая, и после паузы задумчиво произнес: «Ну что же, приезжайте ко мне, давайте посмотрим».

Уточнив адрес, я помчался на встречу и через час уже входил в кабинет, где стояли письменный стол, стулья и, кажется, диван. Из-за стола встал пожилой, как мне казалось тогда, человек небольшого роста, приветливый и доброжелательный – он приветствовал меня крепким рукопожатием и пригласил сесть. Без лишних слов я вручил ему свой приготовленный труд – бегло перелистав диссертацию, Никита Николаевич сказал: «Работа интересная, поэтому я хотел бы познакомиться с ней более подробно. Вам придется подождать. Погуляйте где-нибудь часа три, а потом позвоните мне». Я вышел на воздух и до обеда бродил по городку Вычислительного центра АН СССР, который напоминал лесопарк – уютный и зеленый, тем более что погода стояла тогда тихая, теплая. Я перекусил, выпил кофе в кафетерии, так как сильно нервничал, ходил по дорожкам между корпусами, сидел на скамейке. Через три часа набрал знакомый номер: «Вы где находитесь?» – «Здесь, возле Вас». – «Тогда заходите, я еще у себя».

В кабинете Моисеев усадил меня и сразу же приступил к делу: «Работа интересная и актуальная. Что Вы хотите?» – «Нужны три официальных

оппонента для защиты». Подумав, Никита Николаевич сказал: «Давайте сделаем так. Я соберу Президиум АН СССР по данному направлению – включая всех своих докторов наук, и мы Вам дадим неограниченное количество времени для выступления. Я уверен, что после этого заседания оппоненты для Вас будут определены». Мы проговорили еще часа два, после чего мне не оставалось ничего другого, как сердечно поблагодарить его и за субботу, и за чудесное июльское утро – а фактически целый день, отданные мне, откланяться и, сияя внутри и снаружи, вернуться домой.

Впоследствии я неоднократно воспроизводил в памяти этот день, с пользой для себя припоминая его особенности и подробности. По ходу разговора Никита Николаевич сделал ряд конструктивных замечаний: прежде всего он предложил уточнить название диссертации, приблизив ее к специальности 05.13.06 – Автоматизированные системы управления. Его вариант звучал так: «Имитационное моделирование и алгоритмизация управления дискретно-непрерывным производством», что, во-первых, придавало работе ощутимо больший научный вес, во-вторых, парадоксально «приземляло» с уровня человеко-машинной оптимизации абстрактных систем до конкретных методов и средств имитационного моделирования, алгоритмов управления производством: «Тут Вы будете на коне, это Ваша сильная позиция». Замена «металлургического производства» на «дискретно-непрерывное производство» тоже имела свой смысл – поскольку речь в работе шла не о металлургии как таковой, а о производстве алюминиевых легких сплавов для аэрокосмической отрасли.

Указал мне Моисеев и на основную, с его точки зрения, недоработку: недостаточное внимание к развитию идеи о целесообразности применения имитационного моделирования в интересах управления системами, которые в своей последней книге он предложил именовать нерелефторными. В отличие от технических рефлекторных систем, такие системы, за счет присутствия в них «человеческого фактора», потенциально обладают непредсказуемой реакцией на внешние и внутренние воздействия – в том числе стохастического типа. Мало того, что я полностью согласился со

всеми замечаниями и советами, постарался учесть их при доработке диссертации. На долгие годы я буквально проникся, загорелся идеей использовать имитационное моделирование в интересах управления сложными системами, которые обладают указанными уникальными свойствами. Сегодня такие системы называют и организационно-техническими (поскольку в составе у них есть и техническая часть – оборудование, и организация – производственный коллектив), и социально-экономическими, холоническими, самоорганизующимися, интеллектуальными – однако в память о замечательном ученом и человеке, впервые обратившемся к их изучению, я до сих пор предпочитаю именовать их просто нерелефторными.

В сентябре того же 1979 года я был командирован сначала в Париж, а затем в Национальный университет Республики Бурунди, расположенный в городе Бужумбура, – о которых абсолютное большинство моих нынешних студентов и аспирантов, конечно же, понятия не имеют. В течение трех лет я читал африканцам разного возраста лекции на французском языке, издал два учебно-научных пособия: первое было посвящено исследованию операций (Dimov E.M. Cours de la recherche operationnelle. Universite du Burundi, Bujumbura, Burundi, 1982. – 75 p.), второе – используемым при этом статистическим методам и моделям (Dimov E.M. Cours des methods et modeles statistiques en recherche operationnelle. Universite du Burundi, Bujumbura, Burundi, 1982. – 108 p.). Вернувшись в СССР, напомнить о себе Н.Н. Моисееву постеснялся, но диссертацию под рекомендованным им названием защитил в 1990 году в АН Узбекской ССР (г. Ташкент) – успешно преодолев все препятствия, как домашние, так и московские, на этом долгом пути. И в немалой мере помогало мне ощущение поддержки и одобрения Н.Н. Моисеевым «вектора» моей научной работы – я помнил о содержании нашей встречи и в любых ситуациях чувствовал уверенность в своих силах, в своей правоте. Развитие вот уже в течение почти сорока лет его выдающихся, глубоких и плодотворных идей я считаю одним из главных дел моей жизни в науке.

Получено 25.05.2017

Димов Эдуард Михайлович, д.т.н., профессор Кафедры экономических и информационных систем (ЭИС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. 8-906-340-37-41. E-mail: e.m.dimov@gmail.com

Маслов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой ЭИС ПГУТИ. Тел. 8-917-950-05-13. E-mail: maslov@psati.ru

ALGORITHMIZATION OF QUASI-OPTIMAL CONTROL FOR NON-REFLECTIVE SYSTEMS USING STATISTICAL SIMULATION

Dimov E.M., Maslov O.N.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: e.m.dimov@gmail.com

The paper is dedicated to the 100th birth anniversary of a respected Russian scientist, Nikita Nikolayevich Moiseyev. The impact of Moiseyev's studies on the development of applied mathematics and the theory of non-reflective Complex Systems (CS) was highlighted. The article investigates the problem of managing a sociotechnical non-reflective Complex Systems (CS) using Moiseyev's approach. The impact of uncertainty of the decision-makers (DM) about the CS properties on the management process was considered. The effectiveness of Quasi-Optimal Control for Non-Reflective Complex Systems in real operating conditions was shown. In order to reduce the influence of uncertainties in knowledge of DM, the use of Dimov-Maslov method for statistical simulation is recommended. The article contains examples obtained with the proposed method for multilevel management systems of corporate security and metallurgical production planning. The annex includes Professor Ad.M. Dimov's recollections of personal and creative encounters with N.N. Moiseyev.

Keywords: non-reflective systems, quasi-optimal control, statistical simulation method, two-phase management hierarchy, security, production planning

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.3.01

Dimov Eduard Mikhailovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; Professor of the Department of Economic Information Systems, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +79063403741. E-mail: e.m.dimov@gmail.com

Maslov Oleg Nikolayevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; the Head of Department of Economic Information Systems, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +79023710624. E-mail: maslov@psati.ru

References

1. Moiseev N.N. *Elementyi teorii optimalnykh sistem* [Elements of the theory of optimal systems]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 528 p.
2. Moiseev N.N. *Chelovek, sreda, obschestvo. Problemy formalizovannogo opisaniya* [Man, environment, society. Problems of the formalized description]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 240 p.
3. Moiseev N.N. *Algoritmy razvitiya* [Development Algorithms]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 302 p.
4. Lotov A.V., Moiseev N.N., Petrov A.A. Nekotorye voprosy modelirovaniya programmnoy metoda upravleniya sotsialno-ekonomicheskoy sistemoy [Some questions of modeling a program method for managing the socio-economic system]. *Modeli i algoritmy programmnoy metoda planirovaniya slozhnykh sistem*, 1979, pp. 4-10.
5. Dimov E.M., Maslov O.N., Pcheljakov S.N., Skvorcov A.B. *Novye informacionnye tehnologii: podgotovka kadrov i obuchenie personala. Ch. 2. Imitacionnoe modelirovanie i upravlenie biznes-processami v infokommunikacijah* [New information technologies: personnel training. P.2. Simulation modelling and management of business processes in infocommunications]. Samara, SNC RAN Publ., 2008, 350 p.
6. Anufriev D.P., Dimov E.M., Maslov O.N., Troshin Ju.V. *Statisticheskoe imitacionnoe modelirovanie i upravlenie biznes-processami v social'no-jekonomicheskikh sistemah* [Statistical simulation modeling and business process management in the socio-economic systems]. Astrahan, AstISI Publ., 2015. 366 p.
7. Viner N. *Tvorec i robot*. Russ ed. Moscow, Progress Publ., 1996. 104 p.
8. Dimov E.M., Maslov O.N., Troshin Ju.V. Snizhenie neopredelennosti vybora upravlencheskikh peshenij s pomoshh'yu metoda statisticheskogo imitacionnogo modelirovaniya [Reducing Uncertainty in a Choice of Management Decisions Using Statistical Simulation]. *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 6, pp. 51-57.
9. Dimov E.M. Optimalnoe upravlenie kompleksnyim proizvodstvom diskretno-nepreryvnogo tipa na osnove imitacionnogo modelirovaniya [Optimum control of complex production of discrete-continuous type on the basis of simulation modeling]. *Opyit primeneniya prikladnykh metodov matematiki i vychislitel'noy tehniki v narodnom hozyaystve*, 1975, pp. 58-73.

10. Borisov A.S., Golenko D.I., Dimov E.M. e.a. Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennykh sistem diskretno-nepreryivnogo tipa [Simulation modeling of production systems of discrete continuous type]. *Problemy sluchaynogo poiska*, 1976, no. 5, pp. 197-229.
11. Dimov E.M. Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennoy sistemy diskretno-nepreryivnogo tipa [Simulation modeling of a production system of a discrete continuous type]. *Matematicheskaya i tehnikeskaya kibernetika*, 1977, pp. 114-125.
12. Vittih V.A. *Organizatsiya slozhnykh sistem* [Organization of complex systems]. Samara, SNT RAN Publ., 2010. 64 p.
13. John von Neumann, O. Morgenstern. *Theory of games and economic behavior*. Princeton Univ. Press, 1953. (Russ. ed.: Nejman Dzh. fon, Morgenshtern O. Teoriya igr i jekonomicheskoe povedenie, Moscow, Nauka Publ., 1970. 708 p.).
14. Germeyer Yu.B. *Igry s neprotivopolozhnyimi interesami* [Games with non-conflicting interests]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 327 p.
15. Rastrigin L.A. *Adaptatsiya slozhnykh sistem* [Adaptation of complex systems]. Riga, Zinatne, 1981. 375 p.
16. Algazinov E.K., Sirota A.A. *Analiz i kompyuternoe modelirovanie informatsionnykh protsessov i sistem* [Analysis and computer modeling of information processes and systems]. Moscow, Dialog-MIFI Publ., 2009. 416 p.
17. *Osnovyi teorii upravleniya v sistemah spetsialnogo naznacheniya* [Fundamentals of control theory in special-purpose systems]. Moscow, UDP RF Publ., 2008. 400 p.
18. Maslov O.N. *Bezopasnost korporatsii: modelirovanie i prognozirovaniye vnutrennykh ugroz metodom riska* [Corporate security: modeling and forecasting of internal threats by the method of risk]. Samara, PGUTI-AEROPRINT, 2013. 170 p.
19. Paul J.H. Schoemaker. The Expected Utility Model: Its Variants, Purposes, Evidence and Limitations. *Journal of Economic Literature*, 1982, vol. XX, no. 2, pp. 529–563.
20. Maslov O.N., Frolova M.A. Funktsional ozhidaemoy poleznosti: printsipy modelirovaniya i prakticheskogo primeneniya [Functional of expected utility: principles of modeling and application]. *Infokommunikatsionnye tehnologii*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 291-297. doi: 10.18469/ikt.2015.13.3.09.
21. Maslov O.N., Frolova M.A. Funktsional ozhidaemoy poleznosti v zadachah upravleniya slozhnyimi sistemami organizatsionno-tehnicheskogo tipa [Functional of expected utility: principles of modeling and application]. *Infokommunikatsionnye tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 168-178. doi: 10.18469/ikt.2016.14.2.09.
22. Maslov O.N., Frolova M.A. Analiz proekta sistemy tehnicheskoy zaschity informatsii s primeneniem funktsionala ozhidaemoy poleznosti [Analysis of the project of the system of technical protection of information using the expected utility functionality]. *Zaschita informatsii. Insayd*, 2017, no. 2, pp. 68-72.

Received 25.05.2017

УДК 537.87

МАТРИЧНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАНАРНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ КИРАЛЬНОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИИ

Клюев Д.С., Осипов О.В., Почепцов А.О., Резепова Е.С.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: pao@psuti.ru*

Рассматривается использование матричных методов для расчета характеристик отражающих метаматериалов, состоящих из нескольких планарных слоев на основе сред с пространственной дисперсией и киральностью на СВЧ. Получен явный вид матрицы поверхностного импеданса и матрицы передачи обобщенного слоя метаматериала. В качестве примера рассмотрены задачи отражения плоской электромагнитной волны линейной поляризации от двухслойного кирально-диэлектрического метаматериала на основе тонкопроволочных спиралей, расположенного в воздухе и дважды кирального метаматериала на идеально проводящей подложке. Рассчитаны частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и прохождения основной и кросс-поляризованной компонент поля при различных спиральных включениях и геометрических размерах контейнера кирального метаматериала.