

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, С. А. Потрясаев, Р. М. Юсупов (Санкт-Петербург)

### Введение

В современных условиях существующие и проектируемые сложные организационно-технические объекты (СОТО), как объекты управления, характеризуются нестационарностью и нелинейностью процессов функционирования, большой размерностью, наличием ряда плохо формализуемых факторов, нечёткостью критериев оценивания принимаемых решений, отсутствием априорной информации по ряду параметров, характеризующих состояние СОТО, структурной динамикой СОТО. Перечисленные особенности СОТО не позволяют в рамках какого-то одного класса моделей достигать требуемой степени адекватности описания процессов, происходящих в реально существующих системах.

Многовариантность формального описания объектов управления и соответствующих управляющих подсистем, входящих в СОТО, открывают широкие перспективы по постановке и решению задач адаптивного выбора (синтеза) комплекса моделей и алгоритмов программного управления и регулирования объектами в условиях постоянно изменяющейся обстановки [1,2]. При этом для определенности будем предполагать, что реализацию предлагаемой технологии адаптации программно-математического обеспечения управления (СПМО) мы будем осуществлять в рамках соответствующей имитационной системы (ИмС). В составе такой системы принято выделять: а) взаимосвязанный комплекс имитационных моделей (иерархии имитационных моделей), отражающих определённую проблемную область; б) взаимосвязанный комплекс аналитических моделей (иерархии аналитических моделей), дающих упрощённое (агрегированное) описание различных сторон моделируемых явлений; в) информационную подсистему, включающую базу (банк) данных, а в перспективе базу знаний, основанную на идеях искусственного интеллекта; г) распределённую систему управления и сопряжения, обеспечивающую взаимодействие всех компонент системы и работу с пользователем (лицом, принимающим решения) в режиме интерактивного диалога.

Анализ ранее выполненных работ по данной проблематике показывает [3-7], что в этом случае состав традиционно решаемых задач управления СОТО должен быть дополнен задачами структурной и параметрической адаптации СПМО управления её элементами и подсистемами. При этом реализация концепции адаптивного управления СОТО должна включать в себя следующие основные этапы [1,2,7]: адаптация параметров и структур моделей, алгоритмов управления структурной динамикой (УСД) СОТО к прошлому состоянию объектов управления (ОУ), управляющих подсистем (УП) и внешней среды; комплексное планирование применения СОТО (разработка программ управления её структурной динамикой); имитация условий реализации планов применения СОТО с учётом различных вариантов организации оперативного управления её элементами и подсистемами в конкретных ситуациях; структурная и параметрическая адаптация плана и регулирующих воздействий, моделей, алгоритмов, программ СПМО управления структурной динамикой (УСД) СОТО к возможным (прогнозируемым, в том числе и на имитационных моделях) состояниям ОУ, УП и среды; реализация сформированных регулирующих воздействий в реальном масштабе времени и их адаптация к текущему состоянию ОУ, управляющих подсистем УП и внешней среды.

Для конструктивной реализации рассматриваемой концепции адаптивного управления необходимо, прежде всего, в составе разработанных моделей и алгоритмов УСД СОТО выделить две группы параметров [7]: параметры, настраиваемые на основе реально поступающих в СОТО данных; параметры, настраиваемые на основе экспериментов с имитационными моделями, в которых проигрываются возможные сценарии развития будущих событий.

Организационно процедуры адаптации перечисленных параметров целесообразно осуществлять в рамках двух блоков (моделей) [2]: блок (модель) внешнего адаптера ИмС; блок (модель) внутреннего адаптера ИмС.

Применительно к ранее построенным моделям УСД СОТО в качестве примеров параметров, настраиваемых внешним адаптером и входящих в первую группу, можно назвать следующие величины [1-2]: значения краевых условий, которые должны принимать переменные, входящие в состав моделей УСД; технические и технологические параметры, характеризующие возможности элементов и подсистем СОТО по выполнению стоящих перед ними задач [например, быстродействие и объёмы оперативной и долговременной памяти ЭВМ, максимально (минимально) возможные интенсивности расхода (пополнения) складываемых и не складываемых ресурсов, пропускные способности каналов и трактов передачи данных]; числовые характеристики (параметры), характеризующие реально протекающие и наблюдаемые случайные процессы.

Во вторую группу параметров, настраиваемых уже внутренним адаптером, можно включить: параметры, характеризующие кратность функционального, временного, аппаратно-программного и информационного резервирования элементов и подсистем СОТО; параметры, определяющие приоритетность показателей качества УСД СОТО; параметры, определяющие выбор вариантов реализации управляющих воздействий, компенсирующих отклонение от плановой траектории (плана) в имитационной модели.

Для повышения степени адекватности процессов моделирования наряду с параметрической адаптацией СПМО УСД СОТО (в том случае, когда все её возможности будут исчерпаны) предлагается проводить и структурную адаптацию соответствующих моделей. Принято выделять два основных подхода к решению проблемы структурной адаптации [1-2,7].

В рамках первого подхода из фиксированного множества моделей осуществляется выбор той модели, которая с наибольшей степенью адекватности описывает заданные ОУ и УП. При реализации второго подхода осуществляется конструирование моделей УСД СОТО с требуемыми свойствами на основе некоторого множества элементарных составляющих моделей (модулей).

Анализ показывает, что второй подход по сравнению с первым обеспечивает более гибкую и точную настройку ОУ и УП на конкретные условия их функционирования. Вместе с тем, в отдельных случаях достаточно эффективным оказывается и первый подход в силу более оперативной (по сравнению со вторым подходом) настройки УП и ОУ при наличии достаточно полной базы знаний о предметной области.

Следует подчеркнуть, что как в рамках первого, так и второго подходов к структурной адаптации СПМО УСД СОТО, необходимо активное участие лиц, обосновывающих и принимающих решения (ЛОР, ЛПР), которые должны в интерактивном режиме работы с ИмС предлагать варианты учёта плохо формализуемых и неформализуемых факторов и связей в обобщённой процедуре выбора программ УСД СОТО.

Особенность структурной адаптации СПМО УСД СОТО состоит в том, что на её проведение требуется иметь некоторый промежуток времени, в течение которого необходимо решить следующие основные задачи [1-2,7]: выбор либо конструирование (синтез) моделей УСД СОТО с заданными свойствами; выбор либо конструирование (синтез) алгоритмов УСД СОТО решения конкретного класса задач в заданных условиях; синтез соответствующего программного и информационного обеспечения решения рассматриваемого класса задач; настройка параметров СПМО на текущие и прогнозируемые состояния ОУ, УП (проведение параметрической адаптации).

Попутно следует отметить, что наряду с параметрической адаптацией моделей и алгоритмов, задействованных непосредственно в процессе функционирования СОТО, целесообразно проводить настройку параметров неработающих моделей и алгоритмов до их подключения (в случае необходимости) к процессу функционирования СОТО [7]: рассматриваемая адаптация должна проводиться на основе информации, получаемой от действующих моделей и алгоритмов УСД СОТО.

### Основные научные и практические результаты

В докладе показано, что формальная постановка задач параметрической и структурной адаптации моделей планирования промышленного производства сводится к проблеме многокритериальной оптимизации (выбора) вариантов выполнения комплексов работ и операций, а также материальных, энергетических и информационных потоков с использованием ограниченных ресурсов [1-2,7-10]. Для решения данной проблемы предлагается ее неформальная декомпозиция, основанная на построении совокупности аналитических моделей, отражающих различные стороны функционирования системы и имеющих приемлемую размерность, а также последующего итерационного согласования указанных аналитических моделей по принципу Парето и проведения имитационных экспериментов с получаемыми паретовскими альтернативами (в качестве которых были выбраны программы модернизации и функционирования подсистем СОТО) с целью поиска такой альтернативы (скоординированной программы управления СОТО), которая доставляет экстремум исходному показателю эффективности системы управления СОТО. В качестве параметров адаптации были выбраны компоненты вектора сопряженной системы уравнений [1-2,11].

В основу предлагаемой постановки задачи положена гипотеза о том, что экстремум по исходному (глобальному внешнему) показателю эффективности достигается в одной из точек множества Парето, определяемых при оптимизации по частным ПЭ, выявленных в результате неформальной декомпозиции. В частности, данная гипотеза выполняется во всех случаях, когда имеет место такая монотонная зависимость, при которой значения внешнего ПЭ не убывают, если не убывают значения частных ПЭ. Свойство монотонности в случае задания всех функций в аналитическом виде может быть установлено в результате соответствующего аналитического исследования. Однако, во многих случаях на практике внешний ПЭ не может быть представлен через частные ПЭ в аналитическом виде и его значения могут быть определены лишь посредством имитационных экспериментов. В этих случаях монотонность может быть установлена на основе определенных "физических свойств" моделируемой системы.

В этом случае формулы, описывающие модель функционирования СУ СОТО, запишутся в следующем виде

$$P_H = P_H(\vec{x}(t), \vec{u}_{pl}(t), \vec{v}(\vec{x}(t), \vec{\xi}), \vec{\xi}) \rightarrow \max_{\vec{u} \in \Delta}, \quad (1)$$

$$\Delta = Q(\vec{x}(t)) \times V(\vec{x}(t), \vec{\xi}, t), \vec{u} = \vec{u}_{pk}(t) \times \vec{v}(\vec{x}(t), \vec{\xi}), \quad (2)$$

где  $\bar{x}(t)$ ,  $\bar{u}_{pk}(t)$  – соответственно вектор состояния и вектор управляющих воздействий или, по-другому, программа управления структурной динамикой СУ СОТО;  $\bar{v}$  – вектор управляющих воздействий, с помощью которых парируются возмущающие воздействия на программу управлений;  $Q(\bar{x}(t))$ ,  $V(\bar{x}(t), \bar{\xi}, t)$  – множества допустимых значений векторов  $\bar{u}_{pk}(t)$  и  $\bar{v}(\bar{x}(t), \bar{\xi})$ ;  $\bar{\xi}(t)$  – вектор возмущающих воздействий с область определения  $\Xi(\bar{x}(t), t)$ .

Анализ показывает, что для СУ СОТО взаимосвязь всех перечисленных величин с обобщённым показателем эффективности вида (1) можно конструктивно задать только на уровне машинных экспериментов, проводимых с соответствующей имитационной моделью функционирования СУ СОТО. Однако в этом случае поиск конкретных программ  $\bar{u}_{pk}(t)$  становится весьма затруднительным, так как методы поиска экстремума показателя эффективности, основанные на проведении направленных имитационных экспериментов, из-за большой размерности векторов  $\bar{x}(t)$ ,  $\bar{u}(t)$ ,  $\bar{v}(\bar{x}(t), \bar{\xi})$ , оказываются неприемлемыми. Поэтому для решения рассматриваемой задачи может быть предложена следующая неформальная декомпозиция, основанная на структурных особенностях ранее построенных моделей. В этом случае обобщённую модель функционирования СУ СОТО, которую мы обозначим как  $M$  можно декомпонировать на следующие семь групп моделей:  $MM_{\langle a \rangle} = \langle M_{\langle v \rangle}, M_{\langle o \rangle} \rangle$ ,  $MM_{\langle b \rangle} = \langle M_{\langle k \rangle}, M_{\langle o \rangle} \rangle$ ,  $MM_{\langle c \rangle} = \langle M_{\langle c \rangle}, M_{\langle o \rangle} \rangle$ ,  $MM_{\langle d \rangle} = \langle M_{\langle n \rangle}, M_{\langle o \rangle} \rangle$ ,  $MM_{\langle e \rangle} = \langle M_{\langle e \rangle}, M_{\langle o \rangle} \rangle$ ,  $MM_{\langle f \rangle} = \langle M_{\langle p \rangle}, M_{\langle o \rangle} \rangle$ ,  $MM_{\langle g \rangle} = \langle M_{\langle g \rangle}, M_{\langle o \rangle} \rangle$ , описывающих соответственно взаимодействие моделей управления целевыми и обеспечивающими операциями  $M_{\langle o \rangle}$  с моделями управления вспомогательными операциями  $M_{\langle v \rangle}$ , каналами  $M_{\langle k \rangle}$ , структурами  $M_{\langle c \rangle}$ , потоками  $M_{\langle n \rangle}$ , параметрами операций  $M_{\langle e \rangle}$ , ресурсами  $M_{\langle p \rangle}$  и движением  $M_{\langle g \rangle}$ , основных элементов и подсистем, входящих в рассматриваемую систему управления.

Используя известные методы и алгоритмы построения и аппроксимации областей достижимости, о которых речь шла в [1-2, 11], можно для каждой из перечисленных групп моделей построить соответствующие верхние аппроксимации множеств достижимости:  $D_{(a)}(T_f, T_0, \bar{x}^{(v)}(T_0), \bar{x}^{(o)}(T_0))$ , ...,  $D_{(g)}(T_f, T_0, \bar{x}^{(g)}(T_0), \bar{x}^{(o)}(T_0))$ , где  $(T_f, T_0)$  интервал времени, на котором исследуется процесс функционирования СУ СОТО.

Предварительные исследования показали, что оптимальное решение исходной глобальной задачи (1) достигается в некоторой точке множества Парето  $\bar{x}(\bar{\lambda}') \in D_{(g)}(T_f, T_0, \bar{x}(T_0))$ , определяемой в результате решения частных оптимизационных задач, сформулированных для каждой из перечисленных групп моделей. Для этого необходимо в указанных задачах так задать частные показатели эффективности, чтобы выполнялось свойство монотонности, при котором значения обобщённого показателя эффективности (1) не возрастают, если не возрастают значения частных показателей эффективности.

В этом случае исходная задача управления структурной динамикой СУ СОТО вида (1), (2) заменяется решением следующей совокупности задач:

$$P_H = P_H(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{u}_{pl}(t, \bar{\lambda}'), \bar{v}(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{\xi}), \bar{\xi}) \rightarrow \max_{\bar{\lambda}' \in \Delta'}, \quad (3)$$

$$\Delta' = \{ \bar{\lambda}' \mid \bar{u}_{pl}(t, \bar{\lambda}') \times \bar{v}(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{\xi}) \in Q(\bar{x}(\bar{\lambda}')) \times V(\bar{x}(\bar{\lambda}'), \bar{\xi}) \}, \quad (4)$$

$$\sum_{\gamma' \in \Gamma'} \lambda_{\gamma'} J_{\gamma'}(\bar{x}_{\gamma'}) \rightarrow \text{extr}_{\bar{x}_{\gamma'} \in D_{\gamma'}(T_f, T_0, \bar{x}_{\gamma'}(T_0))} \quad (5)$$

$$\sum_{\gamma \in \Gamma} \lambda'_{\gamma} = 1, \lambda'_{\gamma} \geq 0, \bar{x}_{\gamma} = \|\bar{x}^{(\gamma)T} \bar{x}^{(o)T}\|^T, \gamma' \in \Gamma' = \{a, b, c, d, e, f, g\}. \quad (6)$$

В этом случае при фиксированном значении вектора  $\bar{\lambda}'_{(l)}$  ( $l = 0, 1, 2, \dots$  – номер текущей итерации) решаются задачи поиска векторов  $\bar{x}_{\gamma'}(T_f)$ , при которых функции вида (3) получают экстремальные значения. Данные задачи относятся к классу задач математического программирования, характерная особенность которых состоит в том, что поиск компонент вектора  $\bar{x}_{\gamma'}^{(l)}$  на частных моделях можно осуществлять не на всём множестве альтернатив, задаваемых с помощью соответствующих аппроксимаций множеств достижимости  $D_{\gamma'}(T_f, T_0, \bar{x}_{\gamma'}(T_0))$ , а только на подмножествах недоминируемых альтернатив частных моделей, получаемых в результате ортогонального проектирования целевых множеств на множества  $D_{\gamma'}(T_f, T_0, \bar{x}_{\gamma'}(T_0))$ . При этом в каждую из частных моделей наряду с собственным вектором  $\bar{x}^{(g)}, \bar{x}^{(k)}, \dots, \bar{x}^{(c)}$  входит вектор  $\bar{x}^{(o)}$ , описывающий состояние выполнения комплексов операций в модели  $M_{\langle o \rangle}$ . Перечисленные структурные особенности задач (3), (5) позволяют при её решении провести её декомпозицию и, тем самым, преодолеть проблему размерности.

После получения  $\bar{x}_{\gamma'}^{(l)}(T_f)$ , используя численные методы решения задач оптимального управления (например, метод Крылова-Черноусько), можно осуществить в рамках каждой частной модели  $MM_{\langle a \rangle}, \dots, MM_{\langle f \rangle}$  поиска оптимальных программ управления структурной динамикой СУ СОТО –  $\bar{u}_{pl}^{(l)}(t, \bar{\lambda}'_{(l)})$ . Данные управляющие воздействия используются для поиска очередного приближения вектора  $\bar{\lambda}'_{(l+1)}$  в рамках имитационной модели  $M_{\langle u \rangle}$ , описывающей процесс функционирования СУ СОТО в условиях возмущающих воздействий. Задача поиска  $\bar{\lambda}^*$  на модели (5), (6) по своему содержанию близка к задаче оптимального планирования машинных экспериментов. В ней эндогенными переменными являются компоненты вектора  $\bar{\lambda}'$ , экзогенной переменной служит показатель эффективности (7). При планировании экстремальных машинных экспериментов с  $M_{\langle u \rangle}$  может использоваться метод крутого восхождения, методы случайного поиска, метод « $\psi$ -преобразований», комбинированные методы [1-2, 6, 7, 9-10]. В частности, для метода крутого восхождения (метода Бокса-Уилсона) процедура поиска  $\bar{\lambda}^*$  описывается следующей формулой:

$$\bar{\lambda}'_{(l)} = \bar{\lambda}'_{(l-1)} + \tilde{k} \frac{\partial P_H(\bar{\lambda}'_{(l)})}{\partial \bar{\lambda}'_{(l)}} \Delta \bar{\lambda}'_{(l)}, \quad (7)$$

где  $l = 1, 2, \dots$  – номер итерации;  $\tilde{k}$  – коэффициент, определяющий скорость сходимости итерационного алгоритма.

Частные производные в формуле (7) определяются численно при пошаговом исследовании поверхности отклика с помощью ряда небольших (по объёму) полных и неполных факторных экспериментов, направленных на решение двух важных вопросов, состоящих в выборе направления движения в факторном пространстве (пространстве компонент вектора  $\bar{\lambda}$ ) и в определении вида поверхности отклика в точке, близкой к экстремуму. Использование в указанной процедуре результатов, полученных на аналитических моделях ( $\bar{u}_{pl}^{(l)}(t, \bar{\lambda}'_{(l)})$ ), позволяет значительно сузить область варьирования эндогенных переменных  $\bar{\lambda}'_{(l)}$ . Данные переменные определяют значимость («вес», приоритет) частных показателей эффективности относительно обобщённого показателя эффективности функционирования СУ СОТО. Эти же переменные можно интерпретировать и как параметры, с помощью которых проводится

адаптация аналитико-имитационных моделей функционирования СУ СОТО к возможным сценариям изменения обстановки на  $\langle k \rangle$ -м цикле управления. В заключение отметим, что компонентами вектора  $\bar{\lambda}'$  могут быть также параметры, определяющие выбор вариантов реализации управляющих воздействий  $\bar{v}(\bar{x}(t, \bar{\lambda}'), \bar{\xi})$ , компенсирующих отклонение плановой траектории структурной динамики СОТО  $\bar{x}_{pl}(t)$  от прогнозируемой на имитационной модели траектории  $\bar{x}_u(t)$ . Конструктивность предложенного подхода в докладе проиллюстрирована на примере адаптации моделей объемно-календарного планирования производственной деятельности судостроительного предприятия.

### Заключение

В докладе проведена содержательная и формальная постановка проблемы параметрической и структурной адаптации моделей, используемых при объемно-календарном планировании промышленного предприятия. Необходимость указанной адаптации моделей вызвана объективно существующей структурной динамикой данных предприятий из-за воздействия различных классов внутренних и внешних возмущений. В этом случае за счет адаптации повышается качество и устойчивость сформированных производственных планов. В основу предложенного в докладе подхода положена системно-управленческая интерпретация процессов моделирования производственной деятельности, в рамках которой удается для решения сформулированной проблемы адаптации моделей привлечь математический аппарат современной теории управления.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№ 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214, 17-29-07073-офи-м, 18-07-01272, 18-08-01505, 19-08-00989), Госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетной темы №№0073–2019–0004, международного российско-белорусского проекта Технология – СГ (в рамках СЧ НИР Технология – СГ-3.3.3.1).

### Литература

1. **Охтилев М.Ю.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квадиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
3. **Краснощеков П.С.** Декомпозиция в задачах проектирования / П.С. Краснощеков, В.В. Морозов, В.В. Федоров // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1979. №2. С. 7-18.
4. Методологические вопросы построения имитационных систем: Обзор / С.В. Емельянов, В.В. Калашников, В.И. Лутков и др.; под научн. ред. Д.М. Гвишиани, С.В. Емельянова. М.: МЦНТИ, 1973. 87 с.
5. **Моисеев Н.Н.** Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1974.
6. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 томах. Т.3. Эффективность технических систем / Ред. совет: Б.С. Авдеевский (пред.) и др.; под общ. ред. А.Ф. Уткина, Ю.Б. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
7. **Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В.** Адаптивные системы управления машиностроительным производством. М.: Машиностроение, 1989. 207 с.
8. **Петухов Г.Б.** Основы теории эффективности целенаправленных процессов (методология, методы, модели). Ч.1. М.: МО СССР, 1990. 660 с.

9. **Резников Б.А.** Анализ и оптимизация сложных систем. Планирование и управление в АСУ: учеб. пособие. Л.: ВИКИ, 1981. 148 с.
10. **Цвиркун А.Д.** Структура многоуровневых и крупно-масштабных систем (синтез и планирование развития) / А.Д. Цвиркун, В.К. Акиндиев. М.: Наука, 1993. 160 с.
11. **Черноусько Ф.Л.** Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988. 320 с.