УДК 517.977

Веремей Е.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

КОГНИТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПОДХОДА К СИНТЕЗУ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются вопросы, связанные с применением когнитивных технологий для построения экспертных систем, синтезирующих законы управления подвижными объектами на базе оптимизационного подхода. Актуальность темы определяется часто встречающимися практическими ситуациями, в рамках которых трудно формализовать представление о качестве функционирования проектируемой системы управления. При этом предлагается использовать систему предпочтений эксперта, информация о которой обрабатывается в соответствии с разработанными алгоритмами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Системы управления, компьютерные технологии, методы оптимизации, обратная связь, динамические процессы, эксперт, когнитивный подход.

Veremey E.I.

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

COGNITIVE IMPLEMENTATION OF OPTIMIZATION APPROACH TO THE CONTROL SYSTEM DESIGN FOR MOVING OBJECTS

ABSTRACT

The discussed issue is the application of cognitive technologies for building expert systems that design the control laws of moving objects on the basis of the optimization approach. The relevance of the topic is determined by common practical situations in which it is difficult to formalize the concept of a quality for a designed control system.

It is proposed to use the preferences system of the expert, which is processed in accordance with the developed algorithms.

KEYWORDS

Control systems, computer technologies, optimization methods, feedback control, dynamic processes, expert, cognitive approach.

Введение

Вопросы компьютерной поддержки научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, связанных с системами управления подвижными объектами, в настоящее время играют исключительно важную роль. Это связано, с одной стороны, с развивающимися возможностями компьютерных технологий, а с другой – с постоянно растущими требованиями к качеству движения. Современные системы управления представляют собой многоцелевые аппаратно-программные комплексы с развитой внутренней структурой, наделенные богатой функциональностью при работе в разнообразных режимах. Для них определяются соответствующие требования к качеству, во многом определяемые условиями безопасности и комфорта эксплуатации.

Применение современных компьютерных технологий в исследованиях, проектировании и реализации систем управления, подразумевает использование формализованных математических подходов, как для постановки, так и для решения практических задач. При постановке должны быть сформированы математические модели тех элементов системы, которые исходно задаются и не подлежат дальнейшим изменениям. Если все элементы считаются заданными, то определяются задачи исследования системы, среди которых основное внимание уделяется ее динамическим свойствам (устойчивость движений, управляемость и наблюдаемость, робастность, чувствительность, динамическое качество и т.д.).

Если часть элементов системы подлежит выбору при проектировании, то ставятся задачи синтеза. Результатом их решения служат заранее не заданные математические модели искомых элементов (законы управления, алгоритмы обработки измеряемой информации, модели приводов и др.).

Особая роль принадлежит задачам, определяемым требованиями практического применения в режиме реального времени найденных элементов системы в цифровом варианте. Очевидно, что от состоятельности таких задач в значительной мере зависит мера успешности всего комплекса аналитических работ, связанных с системами управления.

Для каждого из указанных комплексов задач в настоящее время применяется вполне определенная идеология действий, направленных на достижении наилучших результатов с использованием математической и компьютерной поддержки.

В рамках указанной математической формализации соответствующие вопросы, чаще всего, трактуются как различные варианты постановок и решения разнообразных *оптимизационных задач* [1, 3, 4, 6]. Это существенно отличает современную идеологию привлечения математических методов и базирующихся на них компьютерных технологий от классических рекомендаций предшествующих периодов, где оптимизационные приемы применялись обычно только как вспомогательное средство для построения оценок и формирования опорных решений, подлежащих дальнейшей неформальной обработке.

Для строгой математической постановки указанных задач оптимизации должны быть детально проработаны следующие вопросы:

– сформулированы содержательные и формализованные цели моделирования, анализа или синтеза, которые обусловлены конкретной функциональностью системы;

– указаны те элементы рассматриваемой системы, которые фиксированы, а также те её части, которые могут варьироваться, и подлежат выбору;

– определены все обязательные условия и требования, предъявляемые к системе в целом и к ее отдельным элементам;

– указаны количественные ограничения, накладываемы на параметры системы и допустимые динамические процессы;

– представлены характеристики качества функционирования системы.

В зависимости от конкретной ситуации, с учетом содержательной стороной вопроса формулируется тот или иной вариант соответствующей оптимизационной задачи, решение которой ведет к достижению поставленных целей. В силу этого обстоятельства оптимизационный подход является одним из наиболее широко применяемых аналитических и вычислительных инструментов для работы с системами управления различными подвижными объектами. Это объясняется его универсальностью, гибкостью и удобством применения современных методов теории оптимизации для решения практических задач.

Хорошо известно, что любая конкретная проблема по моделированию, исследованию, и, особенно, по проектированию систем управления формулируется с учетом обширной совокупности требований, условий и ограничений, которые должны обеспечиваться выбором варьируемых элементов. Это определяет очевидный универсальный путь формализации таких проблем на базе оптимизационного подхода [6]. Действительно, всегда можно ввести в рассмотрение множество желаемых (допустимых) решений в метрическом пространстве варьируемых элементов на базе указанной совокупности. Тогда в качестве минимизируемого функционала разумно принять расстояние от текущей точки этого пространства до множества желаемых решений. Если численная минимизация этого функционала приводит к нулевому расстоянию, мы получаем решение с желаемыми свойствами.

Естественно, что данная идея подлежит конкретизации в каждой частной ситуации для достижения реализуемости и результативности подхода. Существует масса примеров, когда универсальная оптимизационная идеология порождает весьма удобные и эффективные инструменты: классическим примером служит хорошо известный пакет Response Optimization Tool в составе популярной среды MATLAB-Simulink [2].

Существенной трудностью, стоящей на пути практической реализации оптимизационного подхода, является математическая формализация указанной выше совокупности требований, условий и ограничений, которые должны обеспечиваться выбором варьируемых элементов в рамках решаемой содержательной задачи. В частности, представляется весьма проблематичным суждение о качестве функционирования системы управления с использованием единственного функционала: в подавляющем большинстве рассматриваемые задачи являются многокритериальными.

Однако в целом ряде ситуаций приходится сталкиваться и с трудностями более глубокого плана, когда непосредственная формализация понятия качества функционирования либо крайне сложна, либо вообще невозможна. В таких случаях не формализуемые критерии качества вводятся в процесс решения задачи с использованием мнений экспертов.

Построение экспертных систем для решения указанных выше задач на базе оптимизационного подхода с очевидностью требует широкого привлечения современных технологий для реализации эффективного взаимодействия вычислительной среды и эксперта в рамках конкретных ситуаций. В настоящее время особую роль играют когнитивные технологии [8], в которых используются центральные принципы реализации процессов человеческого познания при создании современных информационных систем.

В данной статье рассматривается вариант когнитивной реализации экспертной системы, предназначенной для параметрического синтеза законов управления подвижными объектами на базе оптимизационного подхода. Центральное внимание уделяется вопросам распределения функций между вычислительной частью системы и экспертом, а также двум вариантам алгоритма обработки информации, получаемой от эксперта в соответствии с его системой предпочтений.

Оптимизационный подход к синтезу законов управления

Динамика подвижных объектов обычно представляется нелинейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}_{in}(t, \mathbf{V}, \omega) + \mathbf{F}_{hd}(t, \mathbf{V}, \omega, \mathbf{x}_p, \delta) + \mathbf{f}_w(t), \tag{1}$$

где векторы $\mathbf{x} = \{\mathbf{V}, \omega, \mathbf{x}_p\} \in E^{12}$, $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\} \in E^3$, и $\omega = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\} \in E^3$, представленные своими проекциями в связанной системе координат, соответственно определяют состояние, линейные и угловые скорости объекта, а вектор $\mathbf{x}_p \in E^6$ – его перемещения и углы поворота. Вектор $\delta \in E^m$ представляет управляющие воздействия на объект, движение которого происходит под влиянием сил и моментов $\mathbf{F}_{in}$, $\mathbf{F}_{hd}$, имеющих инерционную природу и определяемых взаимодействием корпуса с внешней средой соответственно, а также особо выделенных внешних возмущающих воздействий $\mathbf{f}_w(t)$.

Математическая модель (1) дополняется уравнениями динамики приводов

$$\dot{\delta} = \mathbf{F}_{\delta}(t, \delta, \mathbf{u}), \tag{2}$$

где $\mathbf{u} \in E^m$ – вектор управляющих сигналов, а также уравнениями измерителей

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}_y(t, \mathbf{x}, \delta), \tag{3}$$

где $\mathbf{y} \in E^p$ – вектор измеряемых динамических переменных.

Объект управления (1) – (3) в составе системы управления замыкается обратной связью (регулятором) с математической моделью

$$\mathbf{u} = \mathbf{W}(t, \delta, \mathbf{y}, \mathbf{h}), \tag{4}$$

причем векторную функцию $\mathbf{W}$ далее будем считать заданной. В уравнении обратной связи (4) выделен вектор $\mathbf{h} \in E^p$ настраиваемых параметров, который полежит выбору в ходе проектирования. Если этот выбор осуществлен каким-либо способом, то обратная связь (4) полностью синтезирована.

Конкретный *i*-й режим $(i = \overline{1, N})$ движения объекта однозначно определяется заданием начальных условий (для вектора состояния регулятора они обычно нулевые), а также внешних возмущающих воздействий:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0^i,\ \delta(0) = \delta_0^i\ \ \mathbf{f}_w = \mathbf{f}_w^i(t). \tag{5}$$

Будем считать, что указанные заданные элементы принадлежат определенным допустимым множествам, т.е.

$$\mathbf{x}_0^i \in X \subset E^n,\ \delta_0^i \in D \subset E^m,\ \mathbf{f}_w^i(t) \in D_f,\ \forall\ i = \overline{1, N}. \tag{6}$$

Для каждого режима на движениях замкнутой системы (1) – (4) при условиях (5), (6) зададим систему функционалов

$$J_j^i = J_j^i(\mathbf{x}(\mathbf{h},t), \delta(\mathbf{h},t), \mathbf{u}(\mathbf{h},t)) = J_j^i(\mathbf{h}),\ i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,M}\ , \tag{7}$$

которые при прочих равных превращаются в функции вектора $\mathbf{h}$ настраиваемых параметров.

Введем в рассмотрение комплекс требований, предъявляемых к динамике замкнутой системы, с помощью соотношений

$$J_j^i(\mathbf{h}) \le J_{j0}^i,\ i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,M}\ , \tag{8}$$

определяющих допустимые верхние границы для функционалов (7).

И, наконец, на базе условий (8) сформируем допустимое множество Ω настраиваемых параметров, определяя его следующими формулами:

$$\begin{aligned} &\Omega = \Omega_0 \cap \Omega_c, \\ &\Omega_0 = \left\{h \in E^p : J_j^i(h) \le J_{j0}^i,\ i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,M}\right\}, \end{aligned} \tag{9}$$

где $\Omega_c \subset E^p$ – область асимптотической устойчивости в пространстве настраиваемых параметров для всех движений, реализуемых в N рассматриваемых режимах.

Под оптимизационным подходом к настройке варьируемых параметров в данном случае будем понимать постановку и решение задачи о минимизации расстояния от произвольной точки $\mathbf{h} \in E^p$ до множества $\Omega \subset E^p$, т.е. о минимизации функционала

$$J(h) = d(h, \Omega) = \inf_{g \in \Omega} \rho(h, g),\ J(h) \to \min_{h \in E^p}. \tag{10}$$

<u>Экспертная реализация оптимизационного подхода</u>

Сформулированная выше проблема (10) настройки параметров в законе управления (4) с фиксированной структурой предполагает задание функционалов (7), характеризующих качество процесса управления в замкнутой системе (1) – (4) для всех режимов функционирования. Если же такие функционалы исходно не заданы, то оценку качества можно осуществлять с помощью эксперта. При этом очевидно, что для формирования экспертных оценок в практических задачах, связанных с системами управления, должны быть созданы определенные условия, позволяющие эксперту формировать свое мнение относительно того или иного варианта выбора обратной связи.

Указанные условия можно обеспечить путем целенаправленного построения специализированной экспертной системы, в состав которой входит сам эксперт, а также вычислительная среда (ВС), взаимодействующая с ним в режиме прямого диалога. Построение такой среды предполагает применение передовых компьютерных технологий с использованием современных методов теории управления, системного анализа, математического, компьютерного и имитационного моделирования. Основа функционирования ВС определяется тем, что для любого выбора обратной связи (регулятора) U вида (4) она моделирует динамическую ситуацию $S(U)$, представляющую соответствующие процессы управления во всех режимах, и предъявляет ее эксперту в наглядной и удобной для анализа форме.

Эксперт осуществляет неформальное оценивание качества предъявленной информации в силу своей системы предпочтений, позволяющей сравнивать любые два варианта и выбирать из них лучший. Это значит, что если имеется конечная совокупность

$$U_1, U_2, \ldots, U_K\ , \tag{11}$$

оцениваемых обратных связей, для которых вычислительная среда порождает соответствующие динамические ситуации $S(U_1), S(U_2), \ldots, S(U_K)$, то эксперт, в силу собственных предпочтений, может осуществить их ранжирование, а следовательно – и ранжирование совокупности (11), например:

$$S(U_1) \succ S(U_2) \succ \ldots \succ S(U_K) \ \Rightarrow\ U_1 \succ U_2 \succ \ldots \succ U_K.$$

В работе [4] указано, что если система предпочтений эксперта транзитивна, то объективно *существует* некоторый функционал $\Phi(U)$, соответствующий этой системе предпочтений, хотя его формальное представление для эксперта неизвестно.

С позиций рассматриваемого оптимизационного подхода формируемая экспертная система должна обеспечивать минимизацию этого функционала за счет изменения закона (4) реализации обратной связи. Очевидно, что если рассматривается конечная совокупность (11) с достаточно малой величиной K количества вариантов, то минимизация реализуется простейшим путем конечного перебора вариантов. Однако если рассматривается бесконечно большое число вариантов, такой подход не применим.

Рассмотрим иную стратегию функционирования экспертной системы для выбора вектора $\mathbf{h} \in E^p$ настраиваемых параметров в регуляторах вида (4) с фиксированной структурой. Здесь каждому выбору вектора $\mathbf{h}$ будет соответствовать динамическая ситуация $S(\mathbf{h})$, представляющая процессы управления в замкнутой системе (1) – (4) для всех режимов движения.

В данном случае транзитивная система предпочтений эксперта объективно характеризуется функционалом $\Phi(U) = \Phi(\mathbf{h})$, превращающимся в нелинейную функцию, зависящую от p вещественных переменных. Еще раз подчеркнем, что такая функция объективно существует, однако ее аналитическое или алгоритмическое задание не доступно эксперту. Существо предлагаемой стратегии основано на том, что основная функция ВС заключается не в выдаче эксперту конечного числа вариантов законов управления, а в определении такого направления спуска в пространстве E^p, вдоль которого убывает функция $\Phi(\mathbf{h})$.

Иными словами, по любому начальному вектору $\mathbf{h} = \mathbf{h}^0 = \{h_1^0, h_2^0, \ldots, h_p^0\}$ вычислительная среда должна предложить новый вариант вектора $\mathbf{h} = \mathbf{h}^* = \mathbf{h}^0 + \rho\mathbf{e}$ так, чтобы $S(\mathbf{h}^*) \succ S(\mathbf{h}^0)$, где $\mathbf{e} \in E^p$ $(\|\mathbf{e}\| = 1)$ – направление спуска, ρ – величина шага в этом направлении.

Известно, что для непрерывно-дифференцируемой функции $\Phi(\mathbf{h})$ направление спуска однозначно определяется её градиентом в точке $\mathbf{h}^0$: $\mathbf{e} = -\mathbf{g}/\|\mathbf{g}\|$, $\mathbf{g} = \mathrm{grad}\,\Phi(\mathbf{h})|_{\mathbf{h}=\mathbf{h}^0}$, однако эта функция не известна на формальном уровне. Тем не менее, система предпочтений эксперта позволяет получить определённую информацию о градиенте функции $\Phi(\mathbf{h})$ [4].

Для выявления указанной информации введем в рассмотрение следующую систему вспомогательных векторов

$$\mathbf{h}^{0k} = \{h_1^0, h_2^0, \ldots, h_k^0 + \Delta h_k, \ldots, h_p^0\},\ k = 1, 2, \ldots, p, \qquad (12)$$

которые расположены в достаточно малой окрестности точки $\mathbf{h}^0$. Пользуясь своими предпочтениями, эксперт может ранжировать эту систему совместно с точкой $\mathbf{h} = \mathbf{h}^0$, и на базе результатов ранжирования получить соотношения

$$\Phi(\mathbf{h}^{0k}) - \Phi(\mathbf{h}^0) \geq (\leq)\, 0,\ k = \overline{1, p}, \qquad (13)$$

$$\Phi(\mathbf{h}^{0i}) - \Phi(\mathbf{h}^{0j}) \geq (\leq)\, 0,\ i, j = \overline{1, p},\ j > i \qquad (14)$$

с конкретным выбором знака неравенств. При этом согласно (13) имеем

$$g_k = \left.\frac{\partial \Phi(\mathbf{h})}{\partial h_k}\right|_{\mathbf{h}=\mathbf{h}^0} \approx \frac{\Phi(\mathbf{h}^{0k}) - \Phi(\mathbf{h}^0)}{\Delta h_k} \geq (\leq)\, 0,\ k = \overline{1, p},$$

а на основании (14) получаем $\Delta h_j g_j - \Delta h_i g_i \geq (\leq)\, 0$, $i, j = \overline{1, p}$, $j > i$.

Таким образом, исходя из предпочтений эксперта, можно утверждать, что градиент $\mathbf{g}$ функции $\Phi(\mathbf{h})$ в точке $\mathbf{h} = \mathbf{h}^0$ принадлежит многогранному конусу

$$G = \left\{\mathbf{g} \in E^p : g_k \geq (\leq)\, 0, k = \overline{1, p}, \Delta h_j g_j - \Delta h_i g_i \geq (\leq)\, 0, i, j = \overline{1, p}, j > i\right\}. \qquad (15)$$

При наличии полученной информации о градиенте $\mathbf{g}$ далее можно воспользоваться идеологией преодоления неопределенности природы через построение гарантирующей обратной связи. По существу, вычислительная система должна предложить эксперту некоторую новую точку $\mathbf{h} = \mathbf{h}^* = \mathbf{h}^0 + \rho\mathbf{e}$ в пространстве настраиваемых параметров, такую, чтобы $\Phi(\mathbf{h}^*) \leq \Phi(\mathbf{h}^0)$, т.е. при заданном шаге ρ нужно указать соответствующее направление $\mathbf{e}$. Для его поиска представим приращение $\Delta\Phi(\mathbf{h}^0, \mathbf{e}) = \Phi(\mathbf{h}^0 + \rho\mathbf{e}) - \Phi(\mathbf{h}^0)$ в виде ряда:

$$\Delta\Phi\ (\mathbf{h}^0, \mathbf{e}) = \rho \sum_{k=1}^{p} e_k \left.\frac{\partial \Phi(\mathbf{h})}{\partial h_k}\right|_{\mathbf{h}=\mathbf{h}^0} + O(\rho) \approx \rho \sum_{k=1}^{p} e_k g_k = \rho \langle \mathbf{e}, \mathbf{g} \rangle, \tag{16}$$

где $\langle \mathbf{e}, \mathbf{g} \rangle$ – скалярное произведение векторов $\mathbf{e}$ и $\mathbf{g}$, причем $\mathbf{g} \in G$.

Будем выбирать направление $\mathbf{e} \in E^p$ $(\|\mathbf{e}\| = 1)$, решая минимаксную задачу

$$\max_{\mathbf{g}\in G} \rho\langle \mathbf{e}, \mathbf{g} \rangle \to \min_{\mathbf{e}\in E^p, \|\mathbf{e}\|=1} . \tag{17}$$

В работе [4] показано, что задача (17) сводится к задаче квадратичного программирования, решением которой будет искомый вектор

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}^* = \arg \min_{\mathbf{e}\in E^p, \|\mathbf{e}\|=1} \max_{\mathbf{g}\in G} \rho\langle \mathbf{e}, \mathbf{g} \rangle . \tag{18}$$

Представленная идеология работы экспертной системы позволяет предложить следующую схему когнитивного взаимодействия эксперта и ВС для реализации оптимизационного подхода к выбору параметров регулятора (4).

1. Эксперт задаёт начальную точку для настройки $\mathbf{h}^0$ и величину шага ρ .

2. Вычислительная среда порождает систему вспомогательных точек (12) и для каждой из них, а также для начальной точки $\mathbf{h}^0$, генерирует динамическую ситуацию, подлежащую оценке со стороны эксперта.

3. Эксперт ранжирует предложенные ситуации и соответствующие точки, вводя в среду систему своих предпочтений.

4. Вычислительная среда строит конус G (15) и решает минимаксную задачу (17), предлагая эксперту новую начальную точку $\mathbf{h}^* = \mathbf{h}^0 + \rho\mathbf{e}^*$.

Далее процесс повторяется с новой начальной точкой $\mathbf{h}^* = \mathbf{h}^0$ до остановки экспертом.

Безградиентная схема функционирования экспертной системы

Заметим, что по своему существу предложенная выше схема организации взаимодействия эксперта и ВС есть не что иное, как диалоговый вариант метода градиентного спуска. Однако известно, что в практической реализации градиентные методы обладают рядом недостатков, отмеченных в [3], к которым, в первую очередь, относятся:

а) требование непрерывной дифференцируемости функции $\Phi(\mathbf{h})$, которое было постулировано, однако далеко не всегда выполняется;

б) возможность зацикливания вычислительной схемы за счет наличия "овражного" эффекта;

в) плохая сходимость в окрестности стационарной точки.

Этих недостатков лишены методы спуска нулевого порядка, которые не требуют вычисления производных, хотя их сходимость к решению задачи не всегда доказана. В частности, в настоящее время широкое распространение получил метод деформируемых многогранников (метод Нелдера-Мида) [9], реализованный во многих интегрированных инструментальных средах, включая пакет MATLAB.

Идея метода состоит в рассмотрении совокупности вершин $P = \{\mathbf{h}^{01}, \mathbf{h}^{02}, \dots, \mathbf{h}^{0(p+1)}\} \in E^p$ правильного многогранника (симплекса). В качестве одной из вершин принимается опорное решение (начальная точка) $\mathbf{h}^0$. Далее на совокупности P находятся наилучшая $\mathbf{h}_{b1}$ и наихудшая $\mathbf{h}_{w1}$ точки в смысле минимизации функции $\Phi(\mathbf{h})$:

$$\mathbf{h}_{b1} = \arg \min_{\mathbf{h}\in P} \Phi(\mathbf{h}),\ \mathbf{h}_{w1} = \arg \max_{\mathbf{h}\in P} \Phi(\mathbf{h}). \tag{19}$$

После этого шага по определенным правилам (отражение от худшей точки через арифметический центр, растяжения или сжатия многогранника и т.д.) строится точка $\mathbf{h}_{b2}$ такая, что $\Phi(\mathbf{h}_{b2}) < \Phi(\mathbf{h}_{b1})$. Если такую точку найти не удается, многогранник сжимается относительно точки $\mathbf{h}_{b1}$ до достижения условия остановки спуска. Если же такая точка нашлась, то в совокупности P осуществляется замена точки $\mathbf{h}_{w1}$ на точку $\mathbf{h}_{b2}$, а затем операции алгоритма повторяются.

Как следует из существа метода, его применение в схеме диалоговой оптимизации при полном отсутствии формализованной информации о функции $\Phi(\mathbf{h})$ исключительно удобно, поскольку метод в ней и не нуждается. Действительно, в алгоритме используется лишь факт предпочтения, но не значения функции $\Phi(\mathbf{h})$, что делает систему предпочтений эксперта достаточной для реализации безградиентной схемы спуска.

Однако заметим, что по сравнению с градиентным подходом, алгоритм Нелдера-Мида работает медленно. Это определяет целесообразность разработки различных комбинированных вариантов, объединяющие преимущества приведенных схем взаимодействия эксперта и ВС.

Одна из идей такого объединения состоит в следующем. Будем считать, что на k-м этапе вычислений по схеме Нелдера-Мида получен многогранник с вершинами, составляющими совокупность P^k.

Если принять эти вершины в качестве опорных точек для работы диалогового варианта градиентной схемы, и выполнить некоторое количество шагов по этой схеме, то получим диалоговое отображение $P^k \to P_b^k$ исходной совокупности в ее улучшенный вариант. Здесь улучшение понимается в том смысле, что выполняются соотношения

$$\Phi(\mathbf{h}_b^{0j}) \le \Phi(\mathbf{h}^{0j}) \ \ \forall j = \overline{1, p+1}, \ \forall \mathbf{h}_b^{0j} \in P_b^k, \ \forall \mathbf{h}^{0j} \in P^k.$$

Для улучшенной совокупности P_b^k определим наилучшую и наихудшую точки

$$\mathbf{h}_{b1}^b = \arg\min_{\mathbf{h}\in P_b^k} \Phi(\mathbf{h}), \ \mathbf{h}_{w1}^b = \arg\max_{\mathbf{h}\in P_b^k} \Phi(\mathbf{h})$$

и если окажется, что выполняется неравенство $\Phi(\mathbf{h}_{b1}^b) < \Phi(\mathbf{h}_{b1})$, то вместо множества P^k, построенного по обычной схеме Нелдера-Мида, принимаем совокупность P_b^k и продолжаем работу экспертной системы дальше.

Очевидно, что предлагаемый вариант организации взаимодействия эксперта и ВС позволяет использовать преимущества обеих вычислительных схем. Заметим, что при наличии вычислительных трудностей, определяемых недостатками градиентной схемы (негладкости, овраги, приближение к стационарной точке), замена множества P^k на P_b^k не происходит, и минимизация осуществляется по обычной схеме Нелдера-Мида.

Пример построения когнитивных тренажеров

Как было отмечено выше, современные подвижные объекты (морские и воздушные суда, роботы, автомобили и др.) являются исключительно сложными динамическими системами, работающими в различных внешних условиях. К их функционированию зачастую предъявляют противоречивые требования, относящиеся к статическим и динамическим характеристикам рабочих режимов движений, осуществляемых при наличии ряда неопределённостей.

Если в состав системы управления подвижным объектом входит человек-оператор, то отмеченные обстоятельства определяют особое отношение к его подготовке, поскольку успешная деятельность оператора в значительной мере определяет эффективность, безопасность и безаварийность эксплуатации. При этом исключительно высокую значимость имеют вопросы создания современных тренажёров, позволяющих обучать операторов в условиях, предельно близких к реальным условиям функционирования системы управления движением во всех штатных, а также нестандартных и аварийных ситуациях.

При создании тренажеров естественна ориентация на последние достижения в области теории управления, теории имитационных систем, теории экспертных систем, искусственного интеллекта и других смежных сфер. Особую значимость здесь имеет накопленный опыт создания и эксплуатации систем управления движением подвижных объектов различных классов и поколений.

Тренажер предназначен для обеспечения детального изучения оператором понятий и принципов, элементов и узлов, особенностей штатных и аварийных режимов движения объекта. Цель его применения состоит в выработке и совершенствовании навыков по принятию решений в процессе управления.

В состав тренажера входят аппаратные и программные средства, поддерживающие организацию и управление процессом обучения, компьютерное моделирование элементов системы управления и внешней среды, а также имитационное моделирование динамических процессов.

Функции интеллектуального центра современного тренажёра предлагается возложить на экспертную систему, базирующуюся на рассмотренных выше когнитивных принципах. Эта система представляет собой комплекс программного и информационного обеспечения, функционирующий в двух режимах: накопления знаний (при настройке) или обучения оператора с выдачей ему рекомендаций.

Режим обучения реализуется в условиях сложной обстановки, требующей принятия решений со стороны оператора при наличии существенных неопределённостей за ограниченное время.

Заметим, что при ручном управлении подвижными объектами подобные ситуации возникают повсеместно, поскольку сам факт перехода на подобное управление с полным или частичным отказом от включения автоматических систем свидетельствует о необходимости принятия решений в условиях заведомо не формализуемой обстановки.

В качестве примера рассмотрим процесс управления боковым перемещением морского судна с помощью трех исполнительных органов системы управления движением: кормовой поворачивающейся винтовой колонки, а также кормового и носового подруливающих устройств.

Математической моделью движения судна в горизонтальной плоскости служит система обыкновенных дифференциальных уравнений [5, 7] вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(t, \mathbf{x}, \delta), \tag{19}$$

где $\mathbf{x} = (x_1\ x_2\ x_3\ x_4)^{\mathrm{T}}$ – вектор состояния, x_1 – линейная скорость бокового движения, x_2 – угловая скорость движения по курсу, x_3 – угол курса, x_4 – боковое смещение судна. Вектор $\delta = (\delta_1\ \delta_2\ \delta_3)^{\mathrm{T}}$ определяет указанные выше управляющие воздействия. Будем считать, что система (19) задана на отрезке $t \in [t_1, t_2]$, где t_1 и t_2 – моменты начала и окончания маневра соответственно.

Формальной целью управления системой при маневрировании по боковому перемещению является такой выбор управляющего воздействия $\delta(t)$ как функции времени, чтобы из заданного начального положения $\mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}^1 = (0\ 0\ 0\ 0)^{\mathrm{T}}$ объект перешел в заданное конечное положение $\mathbf{x}(t_2) = \mathbf{x}^2 = (0\ 0\ 0\ x_{40})^{\mathrm{T}}$. Здесь величина x_{40} определяет желаемое боковое смещение судна. При этом момент t_2 может быть фиксирован или подчинён требованию максимального быстродействия.

При выполнении перехода в режиме ручного маневрирования в каждый момент времени оператор должен отклонять каждый из управляющих органов на вполне определённую величину, обеспечивая при этом достижение цели манёвра с учётом всех ограничений при желаемом качестве динамического процесса.

В подобной ситуации основная трудность в действиях оператора состоит в том, что он в любом случае *может оценить* последствия своих действий, сравнивая результаты выбора любых двух вариантов $\delta^a(t)$ и $\delta^b(t)$ отклонения исполнительных органов. Однако априори оператор *не может принять* такое решение $\delta^*(t)$, которое в данный момент t было бы наилучшим по отношению к системе его неформальных оценок.

По существу, именно здесь и следует призвать на помощь экспертную систему, которая в каждый момент времени должна предлагать оператору рекомендуемое ею наилучшее поведение исполнительных органов с позиции той или иной системы неформальных оценок качества динамического процесса по обеспечению заданного бокового перемещения судна. Естественно, что подобная система оценок должна быть предварительно введена в экспертную систему в процессе её настройки, которая может выполняться в следующих вариантах:

– независимым экспертом (или экспертами);
– автоматическим регулятором (или регуляторами);
– самим оператором системы.

В первом и во втором случаях настройка экспертной системы происходит на этапах, предваряющих её рабочую эксплуатацию в составе тренажёра (или в составе системы управления судном). При этом могут быть приняты к рассмотрению мнения различных экспертов, имеющих различные подходы к оценке выбора действий исполнительных органов.

Настройка системы с использованием автоматических регуляторов предполагает, что они были синтезированы на базе оптимизации некоторых единых функционалов, которые в формализованном виде в той или иной мере отражают обобщённое представление о качестве динамики рассматриваемого процесса. Для примера здесь можно привести стандартный функционал быстродействия или некоторую неотрицательную функцию, подлежащую оптимальному демпфированию в каждый момент времени.

В третьем случае принципиально возможна настройка на систему оценок оператора непосредственного в процессе его обучения, а при достаточно большом быстродействии бортового компьютера – и непосредственно в процессе управления судном.

Заключение

В статье рассмотрен комплекс вопросов по практическому применению оптимизационного подхода для формирования передовой компьютерной поддержки научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, связанных с системами управления подвижными объектами. Поскольку современные системы управления представляют собой многоцелевые аппаратно-программные комплексы, наделенные богатой функциональностью при работе в разнообразных режимах, для них предъявляются многообразные требования к динамическому качеству, во многом определяемые условиями безопасности и комфорта эксплуатации.

Одним из наиболее эффективных путей удовлетворения указанных требований служит применение оптимизационного подхода на всех этапах моделирования, исследования и практической реализации систем управления движением. Основное внимание в статье уделено ситуации, когда формализация требований к динамическому качеству затруднена. В этом случае возникает потребность в использовании мнений эксперта с оценкой качества на базе его системы предпочтений.

Основным результатом работы являются предложения по построению соответствующих экспертных систем, базирующихся на специально организованном взаимодействии входящих в них вычислительных средств с экспертом в ходе диалога. Целью такого взаимодействия служит эффективное решение неявно поставленной оптимизационной задачи, служащей обеспечению желаемых свойств формируемого решения. В основе схем, реализуемых предлагаемыми системами, лежат идеи когнитивных технологий, определяющих разумное сочетание центральных особенностей человеческого познания и возможностей вычислительных средств.

В работе предложены два конкретных метода, которые определяют схему функционирование экспертных систем, осуществляющих параметрические проектирование обратных связей для управления подвижными объектами на базе оптимизационного подхода. Приведен пример использования идеологии экспертной реализации этого подхода при создании тренажеров для операторов систем управления.

Данная статья написана на базе исследования, которое выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00083 а.

Литература

1. Веремей Е.И. Алгоритмы решения одного класса задач H⍰-оптимизации систем управления // Известия РАН. Теория и сист. управл. 2011, № 3, С. 52 – 61.
2. Веремей Е.И. Оптимизационный подход к моделированию и разработке информационно- управляющих систем // Прикл. информатика. 2012, № 6 (42), С. 31–41.
3. Когнитивный вызов и информационные технологии / Г.Г.Малинецкий [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 46. 28 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-46.
4. Краснощеков П.С., Морозов В.В., Попов Н.М. Оптимизация в автоматизированном проектировании. М.: МАКС-Пресс, 2008.
5. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.Н. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978.
6. Veremey E.I. Dynamical Correction of Positioning Control laws // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Proceedings of the 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS 2013). Osaka, Japan, 2013. Volume 46, Issue 33, pp. 31–36 (2013).
7. Veremei E.I. Synthesis of multi-objective control laws for ship motion // Gyroscopy and Navigation. – Volume 1, Issue 2. – April 2010. – Pages 119-125.
8. Lagarias, J.C., J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," SIAM Journal of Optimization, Vol. 9 Number 1, pp. 112-147, 1998.
9. Simulink Design Optimization: User's Guide. – Natick (Mass.): The MathWorks, Inc., 2012.

References

1. Veremey E.I. Algoritmy resheniya odnogo klassa zadach H⍰-optimizatsii sistem upravleniya // Izvestiya RAN. Teoriya i sist. upravl. 2011, № 3, S. 52 – 61.
2. Veremey E.I. Optimizatsionnyy podkhod k modelirovaniyu i razrabotke informatsionno- upravlyayushchikh sistem // Prikl. informatika. 2012, № 6 (42), S. 31–41.
3. Kognitivnyy vyzov i informatsionnye tekhnologii / G.G.Malinetskiy [i dr.] // Preprinty IPM im. M.V.Keldysha. 2010. № 46. 28 s. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-46.

4. Krasnoshchekov P.S., Morozov V.V., Popov N.M. Optimizatsiya v avtomatizirovannom proektirovanii. M.: MAKS-Press, 2008.
5. Moiseev N.N., Ivanilov Yu.P., Stolyarova E.N. Metody optimizatsii. M.: Nauka, 1978.
6. Veremey E.I. Dynamical Correction of Positioning Control laws // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Proceedings of the 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS 2013). Osaka, Japan, 2013. Volume 46, Issue 33, pp. 31–36 (2013).
7. Veremei E.I. Synthesis of multi-objective control laws for ship motion // Gyroscopy and Navigation. – Volume 1, Issue 2. – April 2010. – Pages 119-125.
8. Lagarias, J.C., J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," SIAM Journal of Optimization, Vol. 9 Number 1, pp. 112-147, 1998.
9. Simulink Design Optimization: User's Guide. – Natick (Mass.): The MathWorks, Inc., 2012.

Поступила 10.10.2016

Об авторе:

Веремей Евгений Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий и систем факультета прикладной математики-процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета, e_veremey@mail.ru.