

Методология моделирования слабоформализуемых социотехнических систем

Аннотация. Обосновано применение нечеткого когнитивного моделирования для управления социотехническими системами (СТС). Сформулированы принципы и предложены методы построения нечетких когнитивных моделей слабоформализуемых СТС.

Ключевые слова: слабоформализуемые социотехнические системы, нечеткое когнитивное моделирование, веса Фишберна, индекс схожести, синтез управляющих решений.

Введение

По мере ускорения научно-технического прогресса разработка методов анализа и управления различными системами становится все более актуальной задачей. При этом значительная часть систем являются социотехническими и кроме естественной (природной) и искусственной (технической) составляющей, в качестве важнейшего элемента содержат в себе человека (его знания, умения, настрой, ценностные установки, отношение к выполняемым функциям), который часто выступает не только в качестве лица, принимающего решение (ЛПР), но и сам представляет собой объект управления. Наличие антропогенного фактора превращает описание СТС в плохо формализуемую задачу [10].

Исследованию плохо формализуемых (ПФ) и слабоструктурированных (СС) систем посвящено достаточно большое количество работ, в которых приведены разнообразные методы представления плохо формализуемых знаний, позволяющие отражать как фактуальные знания о структуре, свойствах объектов предметной области, так и операционные знания о логических, причинно-следственных, ассоциативных зависимостях.

Изучению социотехнических систем (СТС) также посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых, например [8, 11-14]. Однако,

несмотря на несомненные успехи в рамках данного направления, существует достаточно много СТС, анализ и управление которыми не соответствует современным требованиям.

Это связано с тем, что такие системы функционируют в условиях неопределенности, характеризуются недостатком информации, необходимой для формализации протекающих в них процессов. Неопределенность обусловлена, с одной стороны, недостаточностью или полным отсутствием методов и средств измерения координат объекта управления в фазовом пространстве a , с другой стороны, с незнанием закономерностей протекания процессов ввиду их сложности и мало изученности. Указанные факторы приводят к невозможности аналитического описания и построения формальных моделей, учитывающих специфику СТС, что, в свою очередь, значительно снижает эффективность управления подобными системами, а часто делает его в принципе невозможным.

При этом резко возрастает роль ЛПР, который в случае, когда традиционные методы контроля, математического описания или управления не дают желаемых результатов, справляется с задачей с определенной степенью эффективности, опираясь на представления и знания экспертов в данной области и собственные опыт и интуицию [9].

В связи с этим возникает необходимость учета при формализации процессов, происхо-

дящих в СТС, особенностей, связанных с поведением человека, как важнейшего элемента социотехнической системы. Поэтому, при построении формальной модели целесообразно применение методов, основанных на воспроизведении интеллектуальной деятельности ЛПР. Они позволяют снизить степень субъективности принимаемых решений и, как следствие, повышают эффективность управления системой.

Наиболее удобным математическим аппаратом для описания и исследования социотехнических систем, позволяющим реализовать указанные требования и объединить при моделировании аналитические, статистические, лингвистические описания различных подсистем СТС, является нечеткое когнитивное моделирование (НКМ). Неоспоримыми достоинствами НКМ по сравнению с другими методами являются возможность формализации численно неизмеримых факторов, использования неполной, нечеткой и даже противоречивой информации [7].

1. Постановка задачи

Основными особенностями, затрудняющими моделирование и управление плохо формализуемыми процессами в СТС и ограничивающими возможности применения традиционных методов поиска оптимального (или даже приемлемого) управленческого решения, являются нечеткость структуры системы в целом и/или отдельных ее подсистем; нечеткие связи между различными подсистемами и отдельными элементами; «размытость» значений элементов системы и целей ее функционирования; сложность оценки степени достижения нечетко определенного целевого состояния и отсутствие количественной меры отклонения текущего состояния системы от требуемого.

Поскольку в реальных управленческих ситуациях предварительный анализ проблемы и ее структуризация являются первым, наиболее сложным и трудно формализуемым этапом принятия решений [1, 5], ЛПР приходится манипулировать качественной информацией в виде гипотез (предположений), интуитивных понятий и смысловых образов. Многочисленные исследования процессов принятия решений подтверждают, что ему несвойственно мыслить и принимать решения только в количественных характеристиках. Он мыслит, прежде всего, ка-

чественно, и для него поиск решения – это, поиск, в первую очередь, замысла решения, где количественные оценки играют вспомогательную роль [4].

Таким образом, подготовку и принятие решений в задачах управления СТС следует рассматривать как сложный интеллектуальный процесс разрешения проблем, несводимый исключительно к рациональному выбору. Для поддержки этого процесса, особенно на ранних его этапах, представляется целесообразным использовать когнитивный подход к моделированию и управлению, поскольку «он направлен на разработку формальных моделей и методов, поддерживающих интеллектуальный процесс решения проблем благодаря учету в этих моделях и методах когнитивных возможностей человека (восприятие, представление, познание, понимание, объяснение) при решении им управленческих задач» [1].

Анализ особенностей ПФ СС СТС позволил сформулировать принципы моделирования и управления такими системами, а также наметить пути их реализации.

2. Решение задачи

Основное отличие предлагаемой концепции заключается в том, что в ее рамках вводится количественная мера схожести двух нечетких состояний, а интенсивность нечетких связей в НКМ определяется с помощью обобщенных весов Фишберна. Это, в свою очередь, позволяет перейти к разработке методики синтеза управляющих решений, выводящих СТС на необходимый целевой уровень функционирования.

В соответствии с *принципом хранения и аккумуляции знаний в форме каузальных когнитивных карт* в качестве универсальной модели социотехнической системы предлагается использовать кортеж:

$$STS = \langle G, QL, S, R, \Omega \rangle \quad (1),$$

где G – ориентированный граф, имеющий одну корневую вершину и не содержащий горизонтальных ребер в пределах одного уровня иерархии; QL – набор качественных оценок уровней каждого фактора в иерархии (лингвистическая переменная); S – множество весов ребер графа G , отражающих степень влияния концептов на элементы следующего уровня иерархии; R – набор правил для вычисления

значений концептов на каждом из уровней иерархии G ; Ω - индекс схожести, позволяющий распознавать лингвистические значения концептов. В свою очередь G также представляет собой кортеж:

$$G = \langle \{GF_i\}; \{GD_{ij}\} \rangle \quad (2),$$

где $\{GF_i\}$ – множество вершин графа (факторов или концептов в терминологии НКМ); $\{GD_{ij}\}$ – множество дуг, соединяющих i -ю и j -ю вершины (множество причинно-следственных связей между концептами); $GF_0 = K_0$ – корневая вершина, отвечающая цели функционирования системы в целом (целевой концепт).

При построении G на уровне N располагаются концепты, на которые могут оказывать влияние только факторы, расположенные на уровнях меньших N . Уровни иерархии целесообразно формировать на основе функциональной модели процесса. При этом процесс переработки входной информации в выходную последовательно производится отдельными подсистемами (концептами) общей системы. Каждый концепт « m », находящийся на уровне « n », получает на вход набор данных $\{X_{nm}\}$ и перерабатывает его в выходное значение Y_{nm} согласно правилу R^{nm} :

$$Y_{nm} = R^{nm}(X_{nm}) \quad (3)$$

Значения Y_{nm} в свою очередь являются входными данными для подсистем (концептов) более высокого уровня иерархии. Концепты, участвующие в иерархии, в большинстве случаев представляют собой численно не измеримые величины. Поскольку информация о состоянии данных концептов формулируется экспертом в вербальной форме, для *формализации качественной информации* вводится лингвистическая переменная «Уровень фактора» QL и определяется терм-множество ее значений, состоящее в общем случае из 9 элементов, принадлежащих отрицательной QL^- и положительной QL^+ области значений:

$$\begin{aligned} QL &= \{U(QL^-, 0; QL^+)\} = \\ &= \{\text{Высокий отриц. (B)}; \text{Выше среднего отриц. (BC)}; \\ &\text{Средний отриц. (C)}; \text{Низкий отрицательный (H)}; \\ &\text{Нулевой (0)}; \text{Низкий положит. (H}^+\text{)}; \text{Средний} \\ &\text{положит. (C}^+\text{)}; \text{Выше среднего положит. (BC}^+\text{)}; \\ &\text{Высокий положит. (B}^+\text{)}\} \quad (4). \end{aligned}$$

В качестве семейства функций принадлежности используется девятиуровневый классификатор, где соответствующие функции принадлежности нечетких чисел (НЧ), заданных на

отрезке $[-1, 1]$ вещественной оси, представляют собой трапеции:

$$\begin{aligned} &\{B^*(-1; -1; -0,85; -0,75); BC^*(-0,85; -0,75; -0,65; -0,55); \\ &C^*(-0,65; -0,55; -0,45; -0,35); H^*(-0,45; -0,35; -0,25; -0,15); \\ &\langle 0 \rangle (-0,25; -0,15; 0,15; 0,25); H^+(0,15; 0,25; 0,35; 0,45); \\ &C^+(0,35; 0,45; 0,55; 0,65); BC^+(0,55; 0,65; 0,75; 0,85); \\ &B^+(0,75; 0,85; 1; 1)\} \quad (5), \end{aligned}$$

(в нечетком числе $XX(a_1, a_2, a_3, a_4)$ a_1 и a_4 - абсциссы нижнего основания, a_2 и a_3 - абсциссы верхнего основания трапеции).

Суть данного нечеткого классификатора в том, что если о факторе неизвестно ничего, кроме того, что он может принимать любые значения в пределах $[-1; 1]$ (принцип равнопредпочтительности), и надо провести ассоциацию между качественной и количественной оценками фактора, то предложенный классификатор делает это с максимальной достоверностью. При этом сумма всех функций принадлежности для любого $x \in [-1; 1]$ равна единице, что указывает на его непротиворечивость.

Применение классификатора позволяет перейти от качественного описания уровня параметра к стандартному количественному виду соответствующей функции принадлежности из множества нечетких трапецевидных чисел. При этом в рамках такого представления четкие значения после их нормирования и приведения к интервалу $[-1; 1]$ рассматриваются как частный случай, что позволяет реализовать *принцип совместного использования количественной и качественной информации*.

Значения весов $s_{ij} \in [-1; 1]$ из множества S могут быть получены экспертным путем. При этом необходимо учесть, что «мягкие» качественные измерения типа сравнения, отнесения к классу, упорядочения гораздо более надежны, чем назначение субъективных вероятностей, количественных оценок важности критериев, «весов» полезностей и т.п. [3;6]. Кроме того, для эксперта в большинстве случаев затруднительно дать непосредственные численные оценки. Поэтому предпочтительнее ранговые методы, при реализации которых требуется лишь упорядочить критерии.

Для оценки *силы нечетких связей между концептами* в [2] был предложен модифицированный метод нестрогого ранжирования, в соответствии с которым экспертом производится нумерация всех критериев по возрастанию степени их значимости. Причем допускается,

что эксперту не удастся различить между собой некоторые критерии. В этом случае при ранжировании он помещает их рядом в произвольном порядке. Затем проранжированные критерии последовательно нумеруются. Оценка (ранг) критерия определяется его номером. Если на одном месте находятся несколько неразличимых между собой критериев, то за ранг каждого из них принимается номер всей группы как целого объекта в упорядочении.

Найденные предложенным способом оценки представляют собой обобщение системы весов Фишберна для случая смешанного распределения предпочтений, когда наряду с предпочтениями в систему входят и отношения безразличия. Веса Фишберна отражают тот факт, что в системе убывающего предпочтения N альтернатив наилучшим образом отвечает система снижающихся по правилу арифметической прогрессии весов. Поэтому эти веса представляют собой рациональные дроби, в знаменателе которых стоит сумма N первых членов натурального ряда (арифметической прогрессии с шагом 1), а в числителе – убывающие на единицу элементы натурального ряда, от N до 1 (например, $3/6, 2/6, 1/6$). Таким образом, предпочтение по Фишберну выражается в убывании на единицу числителя рациональной дроби весового коэффициента более слабой альтернативы.

При использовании метода нестрогого ранжирования на граф G необходимо наложить систему отношений предпочтения:

$$E = \{GF_i(e)GF_j | e \in (>, \approx)\} \quad (6),$$

где GF_i и GF_j – факторы одного уровня иерархии G ; $>$ – отношение предпочтения; \approx – отношение безразличия.

Такая система позволяет определить обобщенные на случай предпочтения/безразличия факторы по отношению друг к другу веса Фишберна для каждой дуги GD_{ij} (веса связей).

Для вычисления значений на следующем уровне иерархии при известных значениях концептов более низкого уровня, определенных в терминах лингвистической переменной QL , и заданном множестве весов дуг S , влияния нижестоящих концептов агрегируются по правилам R_i из множества R . В качестве элементов множества R , в зависимости от специфики влияния концептов друг на друга, могут выступать мультипликативная, аддитивная, минимаксная и т.п. свертки векторного критерия. При этом

на нижних уровнях иерархии из-за возможности компенсации значений одних факторов за счет других чаще всего применяется аддитивная свертка. Для нахождения значения комплексного критерия GF_0 , в случае, когда он не может рассматриваться как сумма частных критериев, применяется мультипликативная свертка:

$$GF_0 \equiv K_0 = \prod_j K_j^{sign(s_{0j})(1-|s_{0j}|)} \quad (7)$$

в которой под произведением понимается операция умножения соответствующих лингвистическим значениям K_j НЧ из (5); s_{0j} – веса влияния частных критериев K_j на K_0 ($\sum s_{0j} = 1$). Значение мультипликативного критерия, в отличие от аддитивного, резко уменьшается при малых значениях отдельных критериев, что позволяет исключить нежелательные варианты при принятии решения в случае, когда каждый из частных критериев значим, и не допускается их взаимная компенсация. В особо критичных системах в качестве K_0 используется минимальное значение оценки соответствия критериев K_j требуемому значению (принцип «самого слабого звена»).

При нахождении свертки значения некоторых частных критериев необходимо предварительно инвертировать. В случае лингвистического описания для нахождения инверсии (противоположного значения) фактора F предлагается использовать формулу:

$$Inv(F) = \begin{cases} (1 - \mu(F)): \mu(F) \text{ задана на } [0; 1]; \\ (-1 - \mu(F)): \mu(F) \text{ задана на } [-1; 0]; \\ (-\mu(F)): \mu(F) \text{ задана на } [-1; 1]. \end{cases} \quad (8)$$

где $\mu(F)$ функция принадлежности нечеткого числа, соответствующего лингвистическому значению QL_F фактора F .

В случае если возможно четкое (количественное) описание влияния одних концептов на другие, то в качестве элементов множества R выступают аналитические формулы, преобразующие входные данные в выходные.

Если кроме качественных значений факторов в НКМ присутствуют и количественные данные, то простейшим способом для их совместного учета при вычислении свертки векторного критерия является закругление количественных оценок до их качественного описания, и последующий переход к изложен-

ной выше методике оценки. Однако такой подход приводит к потере точности.

Для совместного использования количественной и качественной информации без закругления предлагается методика, предусматривающая использование точного значения количественно измеряемого параметра P_i . Для этого вычисляется нормированное значение \bar{P}_i по формуле:

$$\bar{P}_i = (P_i - P_{min}) / (P_{max} - P_{min}) \quad (9),$$

где P_{min} и P_{max} – минимальное и максимальное значение P_i , соответственно.

Нормирование приводит разнородные параметры к единому интервалу $[-1,1]$. Затем, значение фактора представляется в виде НЧ $X(a_1, a_2, a_3, a_4)$, в котором $a_1=a_2=a_3=a_4=\bar{P}_i$. Если измерения \bar{P}_i произведены с известной погрешностью δ , то $a_1=a_2-\delta$; $a_2=a_3=\bar{P}_i$; $a_4=a_3+\delta$. Таким образом, нормированное значение фактора, имеющего четкое количественное представление, рассматривается как частный случай НЧ, заданного на отрезке $[-1;1]$

При нахождении сверток векторного критерия в иерархии G под суммой или произведением лингвистических значений факторов понимается сумма или произведение соответствующих им нечетких чисел. В этом случае результат также является нечетким числом, которое необходимо лингвистически распознать, чтобы выработать суждение о качественном уровне показателей. Для этого вычисляется индекс схожести Ω , характеризующий степень соответствия значения фактора той или иной качественной оценке из терм-множества лингвистической переменной QL .

Индекс схожести Ω находится следующим образом:

$$\Omega = \frac{(1+\tilde{\rho})}{2} \quad (10)$$

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho_{in}-\rho_{out}}{\rho_{in}+\rho_{out}} \quad (11)$$

где

$$\rho_{in} = \int_{a_1}^{a_4} \min[\mu_1(x); \mu_2(x)] dx;$$

$$\rho_{out} = \left| \int_{b_1}^{b_4} [\mu_2(x)] dx - \rho_{in} \right|,$$

(ρ_{out} - площадь НЧ $B(b_1, b_2, b_3, b_4)$, характеризующего результат, лежащая вне эталонного

НЧ $A(a_1, a_2, a_3, a_4)$, а ρ_{in} - площадь, лежащая внутри этого же эталонного НЧ).

Определенный таким образом индекс схожести, изменяясь от 0 до 1, характеризует близость найденной свертки к тому или иному нечеткому числу, которое, в свою очередь, соответствует элементу эталонного терм-множества. При этом обеспечивается семантическое соответствие: чем больше индекс схожести, тем выше степень соответствия вычисленного значения одному из элементов терм-множества QL .

Разница индексов схожести качественных оценок, полученных экспериментальным и теоретическим путем, может быть использована в качестве метрической характеристики степени адекватности нечеткой когнитивной модели.

Построенная модель должна быть открыта для совершенствования и уточнения. Этому способствует принцип унификации представления новых знаний для включения их в состав модели. Для включения в состав модели новых знаний, полученных в результате изучения процессов, происходящих в исследуемой системе, предлагается представлять эти знания в виде НКМ более низкого уровня, построенной по изложенному выше алгоритму. При этом на верхний уровень передается значение связи, выявленное в ходе анализа НКМ нижнего уровня. Такой иерархический способ построения НКМ позволяет унифицировать форму представления знаний, способствует более эффективно их хранению и обработке.

Значения концептов НКМ в общем случае являются функциями времени t . При проведении динамических расчетов необходимо задать их начальные значения при $t=0$. Тогда значение произвольного концепта K_j в дискретные моменты времени $t=1,2,3,\dots$ находится по формуле:

$$K_j(t) = K_j(t-1) + H(\Delta U_i, STS, t) \quad (12)$$

где $H(\Delta U_i, STS, t)$ – заданная кортежем STS обобщенная функция влияния приращений ΔU_i воздействующих на K_j концептов, на выходное значение K_j .

Для нахождения начальных значений концептов в случае рассмотрения процессов, вызванных объективными источниками (техногенными или природными), используются методы статистического анализа, в результате применения которых после нормирования каж-

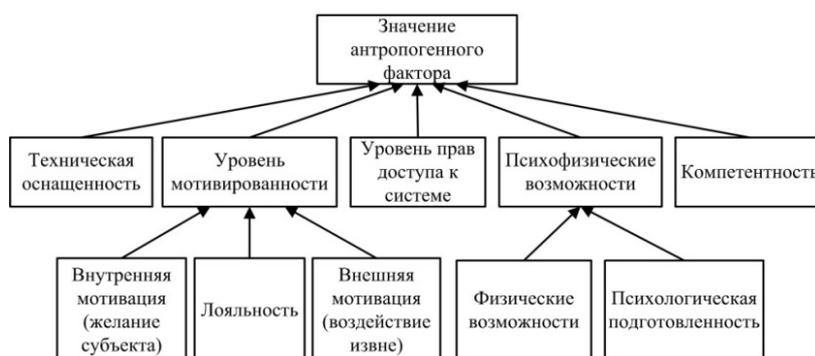


Рис.1. НКМ для определения уровня антропогенных факторов

дому фактору ставится в соответствие некоторая функция принадлежности на $[-1;1]$. В случае же субъективного источника для определения значения концепта необходимо построить «модель субъекта» - НКМ более низкого уровня иерархии. При этом учитываются: уровень прав субъекта в системе; уровень мотивированности его действий, зависящий от степени лояльности, от его психологического портрета, преследуемых субъектом целей и т.д.; психофизические возможности субъекта; его компетентность (уровень знаний и навыков); техническая оснащённость (используемые методы и средства) (Рис. 1).

Последовательное нахождение сверток векторного критерия на всех уровнях иерархии когнитивного функционального графа позволяет оценить состояние системы в текущий момент времени и выработать обоснованное суждение о необходимости *синтеза управляющих решений*, что подразумевает вывод системы на необходимый целевой уровень функционирования, обычно определяемый ЛПР нечетко, путем соответствующих воздействий на наиболее значимые наборы факторов X_i (управляющие кластеры), на которые ЛПР имеет возможность влиять, путем изменения значений входящих в эти кластеры концептов U_i .

Выводы

Таким образом, дополнение арсенала классической теории систем методами НКМ, неформального оценивания и поиска рациональных решений с целью разработки унифицированного подхода к моделированию процессов, протекающих в плохо формализуемых слабоструктурированных СТС, дает возможность расширить класс задач, для которых воз-

можно построение формальных моделей, что, в свою очередь, способствует повышению эффективности управления такими системами.

Предложенный подход к исследованию СТС позволяет учесть все их основные особенности: нечеткая когнитивная модель отражает нечеткость структуры социотехнической системы в целом; нечеткие связи эффективно оцениваются с помощью весов Фишберна; «размытость» значений элементов системы и целей ее функционирования учитывается путем введения лингвистических переменных и соответствующих их терм-множеству нечетких классификаторов, а также количественной меры схожести двух нечетких состояний, многокритериальность – с помощью использования различных «сверток» векторного критерия.

Литература

1. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) // Труды 6-й Международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2006)», М.: ИПУ РАН, 2006, с.41-54.
2. Ажмухамедов И.М. Анализ и управление комплексной безопасностью на основе когнитивного моделирования // Управление большими системами, Вып. 29, 2010. с.5-15.
3. Асанов А.А., Ларичев О.И. Влияние надежности человеческой информации на результаты применения методов принятия решений. // Автоматика и телемеханика, № 5, 1999. с.20–31.
4. Диев В.С. Нечеткость в принятии решений // Философия науки, № 1(4), 1998, с.45–52.
5. Коврига С.В., Максимов В.И. Применение структурно-целевого анализа развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления, №3, 2005, с.39–43.
6. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений.- М.: Наука, 2006.

7. Максимов В.И., Корноушенко Е.К. Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении слабоструктурированных задач // Труды ИПУ РАН, Т.2, 1999, с.95-109.
8. Остапенко Г.А., Мешкова Е.А. Информационные операции и атаки в социотехнических системах. Под редакцией Борисова В.И.- М.: Горячая линия-Телеком, 2006.
9. Проталинский О.М. Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов. - Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004.
10. Проталинский О.М., Ажмухамедов И.М. Системный анализ и моделирование слабо структурированных и плохо формализуемых процессов в социотехнических системах // «Инженерный вестник Дона»: электронный научно-инновационный журнал, №3, 2012 // [http://www. ivdon.ru/magazine/latest/n3y2012/910/](http://www.ivdon.ru/magazine/latest/n3y2012/910/).
11. Chaula J.A. A Socio-Technical Analysis of Information Systems Security Assurance A Case Study for Effective Assurance // Department of computer and systems sciences Stockholm University/KTH Ph.D. Theses: № 06-016 [www.dsv.su.se/eng/publikationer/ index.html](http://www.dsv.su.se/eng/publikationer/index.html)
12. Frey W. Socio-Technical Systems in Professional Decision Making. [Электронный ресурс] <http://cnx.org/content/m14025/latest/>
13. Green D. Socio-technical Systems in Global Markets. [Электронный ресурс] <http://nuleadership.wordpress.com/> 2010/08/23/socio-technical-systems-in-global-markets/
14. Trist E.L. The evolution of socio-technical systems: A conceptual framework and an action research program. // Ontario Quality of Working Life Center, Occasional Paper №.2. Article Source: <http://EzineArticles.com/239366>.

Ажмухамедов Искандар Маратович. Доцент кафедры «Информационная безопасность» института ИТиК ФБГОУ ВПО "Астраханский государственный технический университет" (АГТУ). Окончил Казанский государственный университет в 1983 году. Кандидат технических наук. Автор более 80 печатных работ, в том числе 2-х монографий. Область научных интересов: системный анализ, информационная безопасность. E-mail: aim-agtu@mail.ru

Проталинский Олег Мирославович. Проректор по информатизации ФБГОУ ВПО АГТУ. Окончил Астраханский технический институт рыбной промышленности и хозяйства в 1980 году. Доктор технических наук, профессор. Автор более 140 печатных работ, в том числе 4-х монографий. Область научных интересов: системный анализ плохо формализуемых технологических процессов. E-mail: protalinskiy@gmail.com