

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ КОГНИТИВНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ. Ч. 3: ИНФОРМАЦИОННО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА И ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОГНИТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Бархатова Ирина Александровна¹, Ульянов Сергей Викторович²

¹ Аспирант;

ГБОУ ВО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,

Институт системного анализа и управления;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;

e-mail: i.a.barhatova@gmail.com.

² Доктор физико-математических наук, профессор;

ГБОУ ВО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,

Институт системного анализа и управления;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;

e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

Для гибридных когнитивных / интеллектуальных систем управления выведено информационно-термодинамическое уравнение оптимального распределения показателей качества управления (типа устойчивость, управляемость и робастность), на основе которого возможно спроектировать управляющую силу на объект управления согласно принципу минимальной потери полезного ресурса и требуемого минимума исходной информации для гарантированного достижения цели управления в условиях неопределенности. Рассматривается обобщенная структура когнитивной интеллектуальной системы управления. Основу обобщенной структуры составляют нечеткие и когнитивные регуляторы и введенное информационно-термодинамическое уравнение с применением квантового нечеткого вывода. Рассмотрена связь процессов проектирования когнитивных регуляторов с методами Kansei / Affective инженерии.

Ключевые слова: когнитивный регулятор, интеллектуальное управление, информационно-термодинамический закон, когнитивные интеллектуальные системы управления

INTELLIGENT SELF-ORGANIZED COGNITIVE CONTROLLERS. PT 3: INFORMATION-THERMODYNAMICS QUALITY DISTRIBUTION LAW AND GENERALIZED STRUCTURE OF INTELLIGENT COGNITIVE CONTROL

Barchatova Irina ¹, Ulyanov Sergey ²

¹ PhD Student;

Dubna International University of Nature, Society and Man,

Institute of system analysis and management;

141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;

e-mail: i.a.barhatova@gmail.com.

² Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

Dubna International University of Nature, Society and Man,

Institute of system analysis and management;

141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;

e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

Information-thermodynamic interrelations of optimal disturbance of control quality as stability, controllability and robustness for hybrid cognitive / intelligent control systems are introduced. Control force on control object is designed according to the principle of minimum loss of value resource and required minimum initial information for the guarantee of control goal achievement in uncertainty conditions. Generalized structure of cognitive intelligent control system is considered. Fuzzy cognitive controllers and intro-

duced information-thermodynamic equation with quantum fuzzy inference consists the base of considered cognitive intelligent control system. Interrelations between design process of cognitive controllers and Kansei / Affective engineering are considered.

Keywords: cognitive controller, intelligent control, information-thermodynamic law, cognitive intelligent control system

Введение: когнитивные интеллектуальные системы управления и области применения

Одной из центральных проблем разработки интеллектуальных когнитивных систем управления, как отмечалось в Части 2 настоящей работы, являлась поиск решения задачи проектирования баз знаний (БЗ), в основе которых лежит информация, извлеченная из динамического поведения объекта управления, регуляторов и информации из знаний в сигнале когнитивных процессов на выходе интерфейса «мозг – устройство». В теории и системах интеллектуальных систем управления проектирование БЗ традиционно осуществлялось на основе извлечения знаний из группы экспертов методами теории искусственного интеллекта или на основе интеллектуальных вычислений типа мягких вычислений с применением генетических алгоритмов или нечетких нейронных сетей.

Однако когнитивные способности человека-оператора (включая такие как интуиция, инстинкт и эмоции) принятия решения в сложных ситуациях являются одновременно информационным ресурсом, позволяющий повысить эффективность разработки и применения интеллектуальных систем управления. Экспериментальные исследования коры головного мозга и поведенческих реакций человека-оператора подтвердили гипотезу о взаимосвязи электрического возбуждения отдельных участков коры головного мозга (нейронов или группы нейронов) с определением и прогнозом поведения человека-оператора. При этом сигнал управления может возбуждаться в коре головного мозга при визуализации объекта управления (прямая задача – *Kansei / Affective* инженерия) или возбуждаться от желания (необходимости) целенаправленного управления объектом управления, в частности визуально контролируя динамику объекта управления (обратная задача – когнитивное управление).

С целью повышения эффективности интеллектуального управления и гарантированного достижения цели управления в условиях неопределенности, нештатных ситуаций и возрастающего информационного риска возникла идея применения когнитивных процессов, происходящих в коре головного мозга человека-оператора. В этом случае обработка когнитивных процессов, в виде электрических сигналов электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и регистрируемых интерфейсом «мозг - устройство» с участков коры головного мозга, позволяет спроектировать дополнительные БЗ на основе оптимизатора БЗ на мягких вычислениях и формировать дополнительные силы управления для достижения цели управления. В результате такое объединение (когнитивного регулятора с техническим интеллектуальным регулятором) в контуре управления приводит к формированию нового класса систем управления – когнитивных интеллектуальных систем управления, которые сами в свою очередь могут рассматриваться как социотехническая система.

Рассмотренные ранее в литературе структуры когнитивных систем управления обладали следующими недостатками:

1. Отсутствует методология построения процесса проектирования когнитивного регулятора по заданному сигналу обучения и извлечения знаний из сигналов обучения;
2. Разработанные модели когнитивных регуляторов не робастны или слабо защищены от помех;
3. Выбор структуры когнитивного регулятора существенно зависит от проблемной ориентации, т. е. структуры когнитивных регуляторов не универсальны;
4. Отсутствует метод и инструментарий формирования БЗ когнитивного регулятора по заданному сигналу обучения;
5. Аппаратная реализация требует специальных сложных устройств.

В данной работе рассматривается методология проектирования систем управления в общем случае социотехническими объектами с повышенной социально-экономической ответственностью и ме-

тоды проектирования робастных когнитивных интеллектуальных систем управления, способных гарантировать достижение цели управления в условиях неопределенности исходной информации и риска. Методология охватывает области интеллектуальных систем управления применительно к устройствам, машинам, и человеко-машинным системам с обратными связями в присутствии факторов неопределенности и / или риска.

В частности, разработанные методы проектирования применимы к интеллектуальным системам управления социотехническими системами с повышенным уровнем опасности, в атомной промышленности, авиационной промышленности, к робототехническим системам автоматизированных дискретных / непрерывных производств, горнодобывающей, горно-обогатительной и металлургической промышленности, нефтяной и газовой промышленности, и другим смежным проблемно-ориентированным областям промышленности и непроизводственных процессов медицинских систем и приборостроения, функционирующих в условиях информационного риска и нештатных ситуаций, включая неопределенность, возникающую, по меньшей мере, от присутствия человеческого фактора оператора в контуре управления.

Техническим результатом является повышение степени надежности и уровня робастности интеллектуальной системы управления, гарантированное достижение цели управления в нештатных ситуациях с минимальным расходом полезного ресурса как объектом управления, так и классическим (исполнительского типа) регулятором, по меньшей мере, за счет введения в контур управления с блоком интеллектуального нечеткого регулятора дополнительного блока с когнитивным регулятором, учитывающего в спроектированной базе знаний влияние наличия человеческого фактора в контуре управления на возрастание информационного риска.

Метод когнитивного робастного управления и структура самоорганизующейся интеллектуальной системы управления основаны на синергетическом эффекте квантовой самоорганизации баз знаний в ситуациях неопределенности и риска с применением ИТ квантовых мягких вычислений и *Kansei / Affective Engineering* и позволяют решать, по меньшей мере, указанные задачи.

Знания, извлекаемые как из результатов математического моделирования, так и непосредственно из экспериментально измеренного обучающего сигнала с физической модели объекта управления и человека-оператора применяются для проектирования БЗ интеллектуального нечеткого и когнитивного регуляторов разработанным унифицированным оптимизатором БЗ. Метод повышения уровня робастности интеллектуального управления основан на квантовом алгоритме самоорганизации БЗ интеллектуального нечеткого и когнитивного регуляторов с применением квантового нечеткого вывода. Интеллектуальная система управления содержит классический пропорциональный – интегральный – дифференциальный (ПИД) – регулятор, законы изменения во времени коэффициентов усиления которого проектируются БЗ интеллектуального нечеткого регулятора и/или когнитивного регулятора, реакция которых на новую ошибку управления поступает в виде входного сигнала на блок квантового нечеткого вывода, в котором осуществляется извлечение скрытой (в классических состояниях законов изменения коэффициентов усиления) квантовой информации. За счет извлеченной скрытой квантовой информации, формируются законы робастного изменения во времени коэффициентов усиления классического ПИД-регулятора.

В результате выходной сигнал классического ПИД-регулятора определяет управляющую силу на объект управления как оптимальный результат гарантированного достижения цели управления в непредвиденной ситуации управления с минимальным расходом и потерей полезного ресурса. При этом потери полезной работы регуляторов снижаются как за счет снижения энтропии в объекте управления и технических регуляторах, так и за счет производства дополнительной полезной работы за счет количества информации, воспроизводимого в когнитивных регуляторах через интерфейс «мозг – устройство», что, согласно результатам термодинамики информационных процессов, эквивалентно производству дополнительной свободной энергии.

Обобщенная структура когнитивной интеллектуальной системы управления

Прогресс в исследованиях и разработки современных методов проектирования интеллектуальных систем управления тормозится из-за отсутствия решения одной из основных задач теории искус-

ственного интеллекта: решение задачи извлечения, обработки и формирования знаний непосредственно из динамического поведения объекта управления и построения соответствующего инструментария проектирования БЗ. Таким образом, отсутствует решение обратной задачи теории искусственного интеллекта: извлечение объективных качественных знаний из количественных оценок результатов измерений, необходимых для формирования робастных БЗ. Для решения такой задачи необходим корректный метод и инструментарий проектирования робастных БЗ, которые также отсутствуют в современных инженерных инструментариях. Методы экспертных оценок, отдельные фрагменты технологий мягких вычислений не дают решения о приобретении глобальной робастности БЗ интеллектуальных систем управления. Существующие инструментарии *MatLab* (*ANFIS*, *FuzzyTech*, *AFM* и мн. др.) не дают положительного результата в практическом их использовании на реальных объектах управления [3]. Отсутствие такого инструментария существенно влияет на решение задачи о повышении эффективности интеллектуальных систем управления без изменения аппаратной поддержки технологических процессов.

Многие промышленные компании вынуждены тратить полезный ресурс на разработку и апробацию собственного инструментария, что приводит к потере времени и полезного ресурса, а произведенный программный продукт решает только локальную задачу. Переход к другим объектам управления приводит к необходимости разработки новых методов управления и программного продукта. Разработанный программный продукт в виде оптимизаторов на мягких и квантовых вычислениях [1 – 3] решает поставленную проблему. В разработанных программных продуктах заложены новые алгоритмы извлечения, обработки знаний и формирования БЗ из количественных данных моделирования или экспериментальных данных измерений (обратная задача интеллектуальных систем). В БЗ сформированы продукционные правила принятия решений и управления, реализующие принципы обучения и адаптации объектов управления в условиях непредвиденных ситуаций и неполноты исходной информации. За счет моделирования непредвиденных ситуаций управления и механизма адаптации, заложенного в продукционные правила принятия решений и управления, проектируется БЗ для управления сложными неустойчивыми объектами управления (большое количество «входов-выходов», изменяющиеся внутренние параметры и условия внешней среды), без участия эксперта. В результате разработанный инженерный интеллектуальный программный инструментарий позволяет повысить эффективность и надежность работы существующих (без изменения технологии) или новых проектируемых объектов управления с повышенными социально-экономическими требованиями к эксплуатации.

Примечание. БЗ включают в себя, по меньшей мере, продукционные правила нечеткого логического вывода. Учет в продукционных правилах типа «Если *A*, то *B*» величины приращения информационного риска в виде лингвистической переменной позволяет применить методологию проектирования БЗ на основе мягких вычислений с учетом оценок приращения информационного риска. Таким образом, добавление в логическую посылку ЕСЛИ продукционных решающих правил лингвистических переменных, учитывающих оценку приращения информационного риска в виде энтропийных оценок изменения статистического ансамбля событий дает возможность повысить надежность работы гибридного интеллектуального нечеткого регулятора как исполнительного устройства, функционирующего в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций управления и неопределенности исходной информации. С помощью генетических алгоритмов, реализующих принцип Дарвина выбора лучших решений по заданному критерию отбора, осуществляется проектирование баз знаний. Разработанный алгоритм и соответствующий программный инструментарий позволяет реализовать процесс проектирования таких адаптивных баз знаний без участия эксперта. В результате отсутствует необходимость разрушать достоинства разработанных ранее механизмов управления и существующих технологий производств, а за счет повышения «интеллекта» существующих исполнительных устройств промышленной автоматики повысить их технико-экономическую эффективность.

Разработанный программный инструментарий [1-5] позволяет спроектировать БЗ, которая прошивается в память автономного процессора, на котором спроектирован простой регулятор. В результате, простой по сложности регулятор (исполнительное устройство промышленной автоматики) может эффективно управлять сложными объектами управления. В процесс проектирования включены наиболее применимые на практике традиционные регуляторы (ПИД-регуляторы, дробные регуляторы, H_∞ -регуляторы и регуляторы со скользящим режимом), что позволяет проектировщику существенно расширить диапазон выбора исполнительского уровня. Применение оптимизатора БЗ на мягких и квантовых вычислениях позволяет спроектировать интеллектуальную систему управления с

требуемым уровнем робастности. Отсутствие робастности в структуре интеллектуальной системы управления означает, что объект управления не справляется с поставленной задачей управления в непредвиденных ситуациях управления или в условиях возрастающего приращения информационного риска.

Причины, препятствующие получению требуемого технического результата робастности интеллектуальной системы управления, устраняются разработанной методологией проектирования, чем и обеспечивается получение технического эффекта. Данная задача решается конкретно за счет того, что в ситуациях неопределенности и риска используется разработанный гибридный метод проектирования когнитивного робастного интеллектуального управления и квантовой самоорганизации БЗ на основе квантового нечеткого вывода. Техническим результатом, который обеспечивается приведенной совокупностью признаков, является синергетический эффект формирования робастных БЗ из неробастных БЗ интеллектуальных и когнитивных регуляторов, спроектированных на ситуациях обучения и когнитивного описания / съема экспериментальной информации о поведенческих реакциях или мыслительных процессах человека-оператора.

Полученный технический эффект позволяет эффективно выполнить задачу управления при возникновении события нештатной ситуации (возникающей, например, из-за ошибки человека-оператора) за счет квантовой самоорганизации БЗ. В результате реализуется координационное управление между коэффициентами усиления интеллектуального нечеткого и когнитивного ПИД-регуляторов, которые вырабатывают оптимальные силы управления с минимальной потерей полезного ресурса и максимального достижения цели управления в нештатной ситуации. В качестве инструментария реализации требуемого технического эффекта применяются оптимизаторы баз знаний на мягких и квантовых вычислениях [1-3] и *Kansei / Affective Engineering* [7-10].

Сущность метода робастного интеллектуального когнитивного управления

Разработанный метод заключается в создании модуля гибридного когнитивного интеллектуального квантового регулятора, который входит в состав контура управления структуры робастной интеллектуальной системы управления. Метод основан на синергетическом эффекте квантовой самоорганизации БЗ. Синергетический эффект формируется в реальном времени из ранее спроектированных БЗ интеллектуального и когнитивного регуляторов с применением ИТ квантовых мягких вычислений и *Kansei / Affective Engineering*.

Достижение указанного синергетического эффекта гарантируется применением апробированного инструментария оптимизатора БЗ на квантовых и мягких вычислениях, подтвержденного (моделированием и натурным экспериментом) существования синергетического эффекта самоорганизации БЗ и применением генетического квантового алгоритма оптимального поиска типа и вида корреляций между коэффициентами усиления ПИД-регуляторов. Метод содержит технический эффект в виде повышения робастности ИСУ для гарантированного достижения цели управления в непредвиденных ситуациях и риска.

За счет создания нового синергетического эффекта, полученного от введения в структуру ИСУ блока из интеллектуальных и когнитивных регуляторов, учитывается наличие в контуре управления совместного влияния когнитивных аспектов человеческого фактора и уровней интеллектуальности проектируемых систем управления, функционирующих в условиях неопределенности. В отличие от известных методов теории и систем интеллектуального управления, в контуре управления применяется когнитивный интеллектуальный регулятор в сочетании с нечетким интеллектуальным регулятором и квантовым нечетким выводом.

На вход блока квантового нечеткого вывода поступают оба выходных сигнала указанных регуляторов как одновременной реакции на новую ошибку управления при возникновении непредвиденной (нештатной) ситуации или возрастании приращения информационного риска. Применение оператора квантовой суперпозиции и метода формирования и извлечения интеллектуального состояния сигналов управления коэффициентами усиления указанных регуляторов совместно с оптимальным выбором квантовой корреляции (модель квантового оракула) между классическими и виртуальными

состояниями коэффициентов усиления указанных типов регуляторов обеспечивает наличие технического эффекта в виде синергетического эффекта самоорганизации БЗ.

В результате применения данного метода формируются робастные законы управления коэффициентами усиления квантового ПИД-регулятора в реальном времени, содержащие все свойства интеллектуального и когнитивного управления. При этом каждый из указанных регуляторов в отдельности может в общем случае не справиться с задачей управления в нештатной ситуации.

Система робастного интеллектуального когнитивного управления

На основе представленного метода разработана структура системы робастного интеллектуального когнитивного управления. Система включает в контур управления блок когнитивного регулятора, который аппаратно может быть выполнен в виде соединения когнитивного интерфейса с зондовым электродом в коре головного мозга [11, 12], отвечающего за извлечение и передачу функциональной составляющей желаемой (требуемой) поведенческой реакции человека – оператора в виде соответствующего электрического сигнала.

В отличие от указанной [11, 12] и других систем [13-16] в структуре интеллектуальной системы управления выходной физический электрический сигнал с когнитивного интерфейса подается на обработку в оптимизатор БЗ с целью формирования БЗ, аппроксимирующей данный электрический сигнал. Аналог разработан в [1-6], позволяющий аппроксимировать выходной сигнал применяемого когнитивного интерфейса (как обучающий сигнал) и преобразовать его за счет структуры на трех генетических алгоритмах в БЗ когнитивного нечеткого регулятора.

В результате применения данной операции, за счет извлеченных знаний из обучающего сигнала оптимизатором БЗ на основе технологии мягких вычислений, формируется универсальный нечеткий аппроксиматор системы съема и обработки выходного сигнала когнитивного человеко-машинного интерфейса и формирования БЗ когнитивного регулятора. Данный метод формирования БЗ гибридного когнитивного ПИД-регулятора принципиально отличается от известных методов (в частности, [15-18]), в которых применяются эмпирические оценки когнитивного состояния поведенческих реакций человека – оператора и подбора постоянных коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Данный метод и система формирования БЗ когнитивного ПИД-регулятора принципиально отличается также от известных в литературе методов [19-29].

Интеллектуальный нечеткий регулятор формируется на том же инструментарии оптимизатора баз знаний с технологией мягких вычислений, в качестве обучающего сигнала может быть использован, по меньшей мере, как сигнал с объекта управления, полученного за счет моделирования его математической модели, так и непосредственно снятого с физического (натурного) объекта управления.

Программно-алгоритмическая поддержка реализации процесса извлечения, обработки знаний и формирования баз знаний интеллектуального нечеткого регулятора осуществляется аналогично методу формирования баз знаний когнитивного регулятора.

Квантовый нечеткий вывод (как квантовый поисковый алгоритм) осуществляет параллельную обработку входных сигналов с интеллектуального нечеткого регулятора и когнитивного регулятора за счет оператора квантовой суперпозиции и за счет применения квантового генетического алгоритма для выбора типа и вида квантовой корреляции между коэффициентами усиления интеллектуального нечеткого и когнитивного ПИД-регуляторов. Оператор интерференции (совместно с оператором измерения) извлекает интеллектуальное квантовое состояние для формирования робастного сигнала управления коэффициентами усиления квантового ПИД-регулятора.

В результате применения квантового нечеткого вывода осуществляется квантовая самоорганизация БЗ, и, как технический результат, реализуется адаптивный процесс формирования в режиме реального времени законов изменения коэффициентов усиления квантового ПИД-регулятора.

Процесс проектирования квантовой самоорганизации БЗ подробно описан [1, 2]. Данный метод квантового когнитивного управления на основе самоорганизации БЗ в реальном времени отличается от известных в литературе методов управления макрообъектами на основе квантовых вычислений [21-29].

Описание метода когнитивного интеллектуального управления и принципа работы интегрированной когнитивной робастной ИСУ

Метод и принципиальная структура системы когнитивного робастного интеллектуального управления сложными социотехническими объектами представлены на рис. 1.

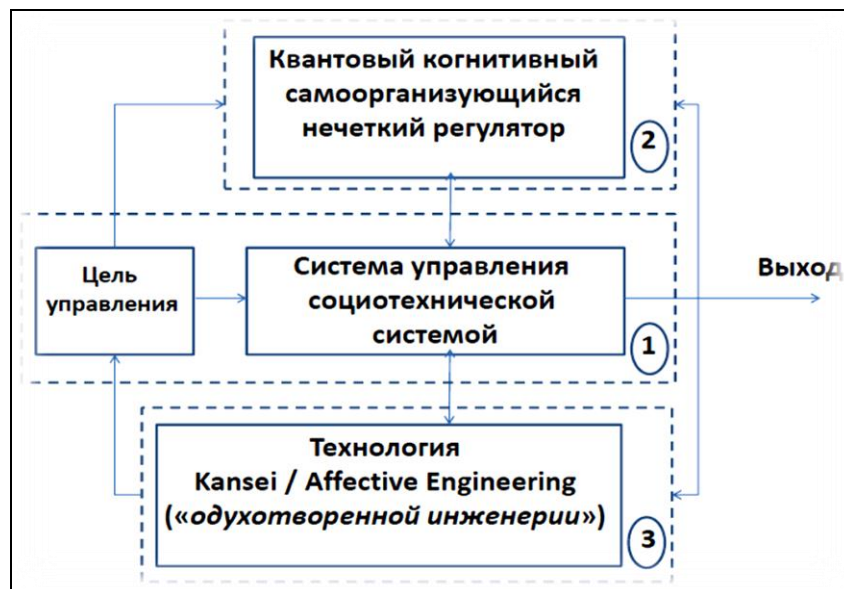


Рис. 1. Принципиальная структура интеллектуальной системы управления социотехнической системой на основе квантового когнитивного самоорганизующегося нечеткого регулятора

Система включает синергетический эффект от совместного применения способов интеллектуального управления объектами управления с обратной связью, основанного на технологиях квантовых мягких вычислений, и метода когнитивного управления, основанного на технологии *Kansei / Affective Engineering*.

Синергетический эффект заключается в возможности формирования робастного квантового сигнала управления из неробастных классических сигналов интеллектуального и когнитивного управления в случае непредвиденной ситуации управления или приращения информационного риска от непосредственного присутствия человеческого фактора в контуре управления.

В частности, на рис. 1 выходной сигнал из блока «Цель управления» формируется из информации, содержащейся в выходном сигнале Блока «Технология *Kansei / Affective Engineering*», который формирует задание и описание цели управления в общем случае человеком-оператором (см. аналог применения технологии *Kansei / Affective Engineering* в интеллектуальном управлении в [10] Часть 1 настоящей работы). В результате сигнал из блока «Цель управления» включает в себя информацию о количественных и качественных характеристиках цели управления. Далее информационный сигнал из блока «Цель управления» поступает в блок «Квантовый когнитивный самоорганизующийся нечеткий интеллектуальный регулятор» и в блок «Система управления социотехнической системой», на вход которой поступает также выходной управляющий сигнал из блока. Выходной сигнал из объекта управления содержит информацию о поведенческих реакциях и динамического поведения социотехнической системы как объекта управления и по обратной глобальной отрицательной связи поступает в блок 3. Выходной сигнал с блока 1 поступает в блок 2 и 3, осуществляется сравнение выходного сигнала объекта управления с сигналом цели управления и осуществляется классический принцип теории управления – компенсация ошибки управления, и интеллектуальное когнитивное управление на непредвиденную ситуацию управления и / или приращения информационного риска.

В результате структурная схема управления на рис. 1 включает в себя как частный случай основные законы процессов управления и позволяет на основе данного метода включить непосредственно в контур управления человеческий фактор, что приводит к гибриднему когнитивному интеллектуальному управлению в условиях непредвиденных ситуаций управления и риска.

Блок «Квантовый когнитивный самоорганизующийся нечеткий интеллектуальный регулятор» на рис. 1 представлен структурно на рис. 2.

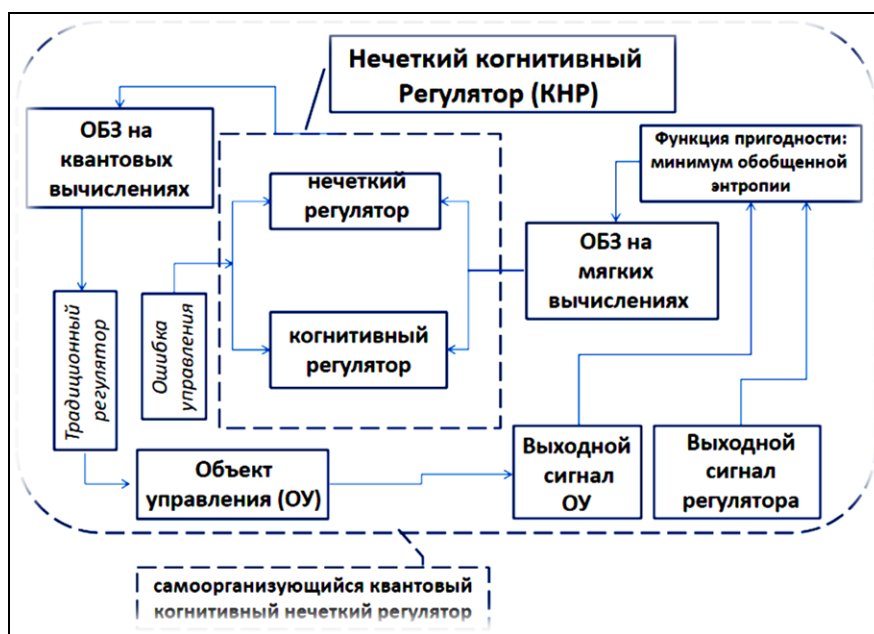


Рис. 2. Структурная схема квантового когнитивного самоорганизующегося нечеткого регулятора

Ошибка управления определяется выходным сигналом на рис. 2, сигнал ошибки управления поступает одновременно на вход «Нечеткий регулятор» и «Когнитивный регулятор», а также в блок «Традиционный регулятор» соответственно. Выходные сигналы блока «Объект управления» поступают параллельно в виде сигналов соответственно в блок «Функция пригодности», представляющий векторный критерий качества управления, в частности минимум обобщенной энтропии системы «ОУ + регулятор» и минимум среднеквадратичной ошибки управления.

Из блока «Нечеткий когнитивный интеллектуальный регулятор» выходной сигнал поступает на вход блока «ОБЗ на квантовых вычислениях» и реализуется процесс квантовой самоорганизации БЗ на основе квантового нечеткого вывода. Выходным сигналом является вектор законов управления коэффициентами усиления традиционного регулятора типа П(И)Д-регулятора, содержащие качественные и количественные характеристики робастного сигнала управления коэффициентами усиления регулятора. Выходным сигналом является оптимальная сила управления, действующая на объект управления с минимальной потерей полезного ресурса в объекте управления и в регуляторе и гарантирующая достижение цели управления в условиях непредвиденных ситуаций управления и приращения информационного риска.

Проектирование БЗ в блоке нечеткого регулятора осуществляется программным инструментарием, подробно описанного в [3].

В ОБЗ на мягких вычислениях поступает одновременно сигнал, представляющий собой информационный носитель, задающий описание присутствия человеческого фактора в контуре управления интеллектуальной системы управления. Выходному сигналу когнитивного регулятора соответствует сигнал 3015 на схеме рис. 3, которая описывает структурный механизм формирования БЗ когнитивного нечеткого регулятора на рис. 2.

Рассмотрим подробнее схему на рис. 3.

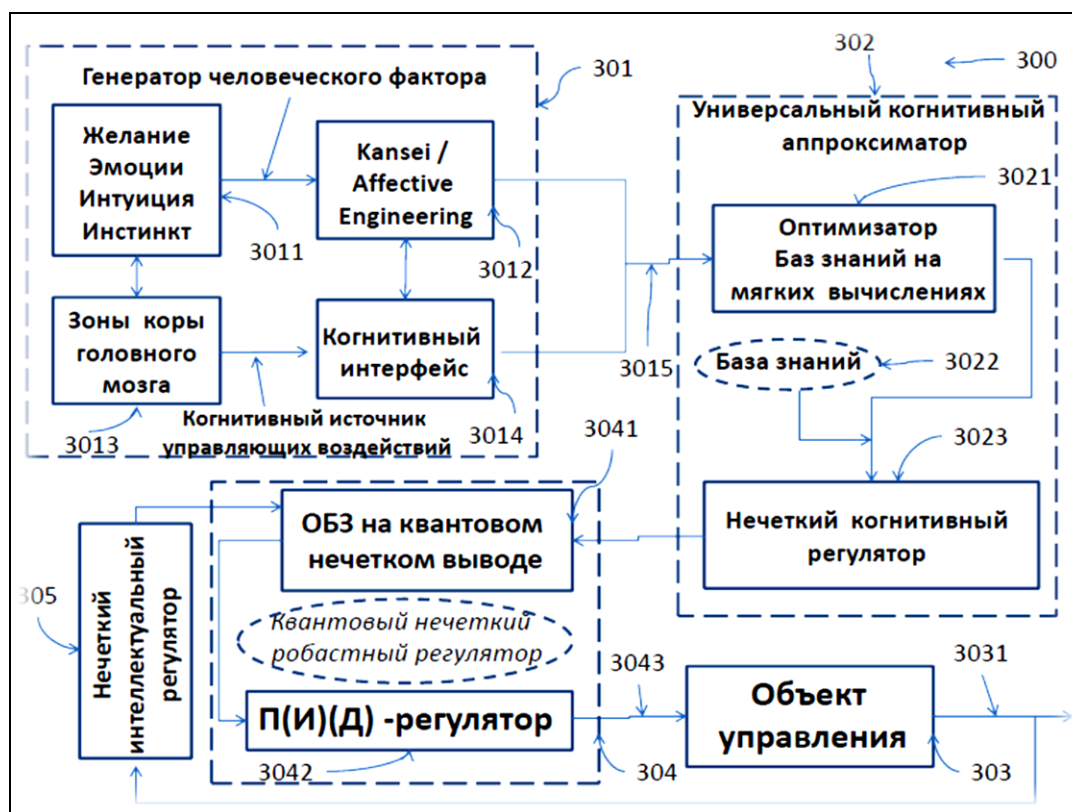


Рис. 3. Структурный механизм формирования БЗ когнитивного нечеткого регулятора

Сигнал 3015 является выходным сигналом блока 301, который состоит из блока 3011 «Желание, эмоции, интуиция, инстинкт, воля и др.», блока 3012 «*Kansei / Affective Engineering*», блока 3013 «Зоны коры головного мозга» и блока 3014 «Когнитивный интерфейс». Блоки 3011, 3012, 3013 и 3014 могут быть реализованы в виде известных аналогов, приведенных в описании литературных источников [11-20]. Сигнал 3015 поступает в блок 3021 «ОБЗ на мягких вычислениях», выходной сигнал которого 3022 применяется для формирования БЗ когнитивного регулятора 3023. В силу универсальности инструментария ОБЗ на мягких вычислениях извлечение знаний из обучающего сигнала 3015 и формирование БЗ в виде сигнала 3022 для блока 3023 осуществляется аналогично процессу проектирования нечеткого регулятора.

В результате блок 302 реализует универсальный аппроксиматор нечеткого отображения описания когнитивных функций человека-оператора.

Выходной сигнал из блока 3023 поступает в блок 3041 «ОБЗ на квантовом нечетком выводе», в котором реализуется квантовая самоорганизация БЗ из БЗ когнитивного 3023 и нечеткого 305 регуляторов для изменения параметров коэффициентов усиления традиционного регулятора в блоке 3042. Блоки 3041 и 3042 образуют программно совместимый гибридный квантовый когнитивный нечеткий робастный регулятор в блок 304, учитывающий уровень интеллектуальности и когнитивные параметры присутствия человеческого фактора в контуре управления.

Выходной сигнал 3043 формирует оптимальную управляющую силу на объект управления в блоке 303 с требуемым минимальным расходом полезного ресурса и нормой поведенческих реакций объекта управления при вмешательстве человека-оператора в процесс управления выходным сигналом 3031.

В результате структура когнитивной робастной ИСУ на рис. 1 преобразуется в блок 400 на рис. 4. Выходной сигнал блока 407 «Источники знаний для проектирования баз знаний нечетких регуляторов», состоящего из блока 4071 «Человеческий фактор» и из блока 4072 «Технология *Kansei / Affective Engineering*», формирует цель управления в блоке 408 и передает выходной задающий сигнал на компаратор 4081, на выходе которого вырабатывается новая ошибка управления, поступающая на вход блока 405 «Традиционный регулятор». Выходной сигнал 4051 блока 405 поступает в виде входного сигнала в блок 4011 и в виде входного сигнала с помехами от блока 404 на сумматор 4041. Выходной сигнал сумматора 4041 формируют управляющую силу на объект управления в бло-

The diagram illustrates a complex control system architecture. At the top, a dashed green box contains a 'Квантовый когнитивный регулятор' (Quantum Cognitive Controller) which includes a 'Нечеткий когнитивный регулятор' (Fuzzy Cognitive Controller) and an 'ОБЗ на мягких вычислениях' (Fuzzy Computation Interface). This interface is connected to an 'ОБЗ на Квантовом Нечетком Выводе (КНВ)' (Quantum Fuzzy Inference Interface) and a 'Когнитивный регулятор (КР)' (Cognitive Controller). The 'КР' is further connected to a 'Традиционный регулятор' (Traditional Controller) and a 'Система измерений' (Measurement System). The 'Традиционный регулятор' is connected to an 'Объект управления' (Controlled Object) and a 'Система автоматического управления' (Automatic Control System). The 'Система автоматического управления' is connected to a 'Цель управления' (Control Objective) and a 'Технология Kansei / Affective Engineering' (Kansei / Affective Engineering Technology). The 'Технология Kansei / Affective Engineering' is connected to a 'Человеческий фактор' (Human Factor) and a 'Система измерений'. The 'Система измерений' is connected to a 'Нештатные ситуации' (Emergency Situations) and a 'Система автоматического управления'. The 'Нештатные ситуации' is connected to an 'Объект управления'. The 'Объект управления' is connected to a 'Выход' (Output) and a 'Система измерений'. The 'Система измерений' is connected to a 'Система автоматического управления'. The 'Система автоматического управления' is connected to a 'Цель управления'. The 'Цель управления' is connected to a 'Технология Kansei / Affective Engineering'. The 'Технология Kansei / Affective Engineering' is connected to a 'Человеческий фактор'. The 'Человеческий фактор' is connected to a 'Система измерений'. The 'Система измерений' is connected to a 'Нештатные ситуации'. The 'Нештатные ситуации' is connected to an 'Объект управления'. The 'Объект управления' is connected to a 'Выход'.

Выходной сигнал из блока 402 поступает совместно с сигналом на блок 4011 «ОБЗ на мягких вычислениях», в котором проектируются БЗ нечеткого регулятора 40121 и когнитивного регулятора 40122. На вход блоков 40121 и блока 40122 поступает одновременно с сигналом на блок 4011 новая ошибка управления. Блоки 40121 и 40122 образуют структурно блок 4012 «Нечеткий когнитивный регулятор». Совместный выходной сигнал 40123 из блока 4012 поступает в блок 4013 «ОБЗ на квантовом нечетком выводе». Блоки 4011, 4012 и 4013 структурно образуют блок 401 «Квантовый когнитивный самоорганизующийся регулятор», выходной сигнал 40131 которого формирует законы изменения коэффициентов усиления традиционного регулятора в блоке 405. В результате на выходе блока 405 проектируется требуемая управляющая сила.

Блок 501 содержит блок 5011 «ОБЗ на мягких вычислениях» для проектирования БЗ нечеткого регулятора (НР1) в блоке 50121 и нечеткого когнитивного регулятора (НКР2) в блоке 50122. Выходные сигналы 50124 и 50125 блока 50121 и блока 50122 соответственно, как реакции спроектированных в блоке 5011 БЗ в реальном времени, поступают на вход блока 50123 «Квантовый нечеткий вывод (КНВ)».

В результате, при наличии непредвиденных ситуаций в блоке 504, которая содержится интегрально в блоке 505 в виде изменения ошибки управления на новую ситуацию управления, в виде шумов в блоке 502, действующих на объект управления в блоке 503, времени задержки ошибки управления в блоке 5041 при измерении сигнала обратной связи в блоке 5043, наличия внутренних

шумов в датчиках в блоке 5042, резкого изменения цели управления в виде задающего сигнала (З.С.) самоорганизующаяся робастная когнитивная система управления в блоке 500 гарантирует достижение цели управления.

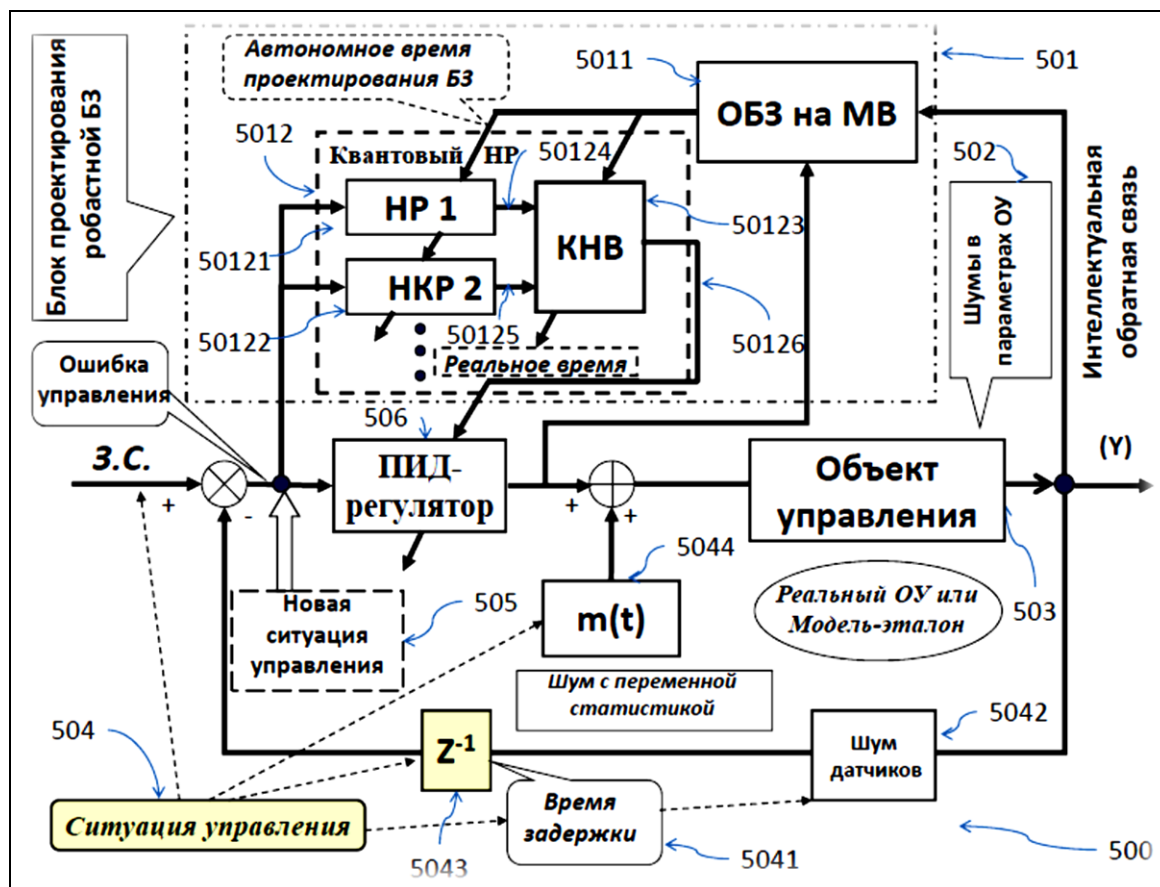


Рис. 5. Структура спроектированной интегрированной интеллектуальной системы управления в непредвиденных ситуациях

Примеры применения когнитивной интеллектуальной системы управления рассмотрены в Частях 4 и 5 настоящей работы.

Здесь рассмотрим важный вопрос о распределении критериев качества управления на основе аналитического информационно-термодинамического соотношения между устойчивостью, управляемостью и робастностью системы управления, что позволяет реализовать принцип минимума потери полезного ресурса и минимума исходной информации для гарантированного достижения цели управления в условиях неопределенности и информационного риска.

Информационно-термодинамические аспекты когнитивного интеллектуального управления: устойчивость, управляемость и робастность интеллектуального когнитивного управления

Рассмотрим особенности термодинамического анализа динамических и информационных свойств систем управления [1-6].

Информационно-термодинамическое распределение мер качества управления

Допустим, что объект управления описывается в общем виде уравнением $\dot{q}_i = \varphi(q, t, S(t), u)$, где обобщенная координата q_i описывает движение объекта управления, u представляет управление и $S(t) = S_{oy}(t) - S_p(t)$ представляет обобщенную энтропию системы как разность между производством энтропии объектом управления $S_{oy}(t)$ и производством энтропии $S_p(t)$ регулятором.

Рассмотрим уравнение следующего вида:

$$\underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{устойчивость}} = \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, S(t), u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{(S_{oy} - S_p) \cdot (\dot{S}_{oy} - \dot{S}_p)}_{\text{робастность}} \leq 0 \quad (1)$$

Уравнение (1) связывает в аналитической форме такие качественные понятия теории управления как устойчивость V (функция Ляпунова), управляемость и робастность на основе понятия энтропии феноменологической термодинамики [1-6].

Такой подход позволяет, как отмечалось ранее, найти необходимое распределение между уровнями устойчивости, управляемости и робастностью, позволяющее достигать цели управления в нештатных ситуациях с минимальным расходом полезного ресурса за счет применения в качестве функции пригодности в генетическом алгоритме минимум производства обобщенной энтропии, входящей в правую часть (1).

Рассмотрим теперь (1) с учетом связи термодинамической энтропии с информационной энтропией Шеннона. Термодинамическое определение S и информационной H энтропий связаны соотношением фон Неймана^{1,2} в виде: $S = kH = -k \sum_i p_i \ln p_i$, где $k \approx 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К и является постоянной

Больцмана. Подставим в уравнение (1) вместо $S(t)$ информационную энтропию Шеннона H .

В результате получим

$$\underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{устойчивость}} = \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, k(H_{oy} - H_p), u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{k(H_{oy} - H_p) \cdot (H_{oy} - \dot{H}_p)}_{\text{робастность}} \leq 0 \quad (2)$$

Таким образом, уравнение (2) связывает также устойчивость, управляемость и робастность, но уже на основе информационной энтропии Шеннона, позволяющее также определять управление для гарантированного достижения цели управления в нештатных ситуациях с требованием минимального количества информации о внешней среде и о состоянии объекта управления.

Следовательно (1) и (2) составляют систему уравнений, решение которой определяет управление, гарантирующее достижение цели управления в нештатных ситуациях с минимальным расходом полезного ресурса и минимально требуемой исходной информации.

О соотношениях между количеством информации и полезной работой

Рассмотрим некоторые особенности дополнительных связей между понятиями количества информации и физической энтропии в свете приведенных уравнений (1) и (2). Так определение физической энтропии дает возможность количественной формулировки второго закона термодинамики, который запрещает в изолированной процессы, сопровождающиеся увеличением энтропии. При этом если возможен приток информации dI о системе, т.е. если физическая система является изолирован-

¹ Tribus M., Shannon P.T., Evans R.B. Why thermodynamics is a logical consequence of information theory // A. I. Ch. E. Journal. – 1966. – Vol. 12. – №2. – Pp. 244-248.

² Bais F.A., Farmer J.D. Physics of information. - SFI WORKING PAPER: 2007-08-029. – [www.santafe.edu]. The Handbook on the philosophy of information, Ed by J. van Benthem and P. Adriaans. – 2009.

ной лишь в тепловом, но не в информационном отношении, то указанный закон следует обобщить³, заменив неравенство $dH \geq 0$ неравенством $dH + dI \geq 0$. Поэтому, если имеется приток информации, то можно тепловую энергию системы превратить в механическую без помощи холодильника.

Из приведенного следует, что возможно построить вечный двигатель второго рода, питающийся информацией. Обобщение второго закона термодинамики не отменяет его первоначальной формулировки. Отсюда следует заключение о необходимости энергетических затрат при измерении координат физической системы и записи этой информации. Если система находится при температуре T , то для получения и записи количества информации dI о ней необходимо потратить как минимум TdI энергии. В противном случае соединение автоматического измерителя и информационного преобразователя тепловой энергии в механическую дало бы вечный двигатель второго рода. Вывод о необходимости минимальных энергетических затрат распространяется также на физические каналы с шумом, соответствующим заданной температуре T . Таким образом, второй закон термодинамики накладывает некоторые ограничения на возможности физической реализации информационных систем, в частности автоматов-измерителей и каналов передачи информации.

Максимальное количество тепловой энергии, переходящее в работу, равно произведению абсолютной температуры на количество приходящей информации Больцмана. Приток информации о физической системе позволяет переводить тепловую энергию в работу без передачи части тепловой энергии холодильнику.

Пример: *Демон Максвелла*. Возможность описанного обобщения второго закона термодинамики на случай систем с притоком информации возникла давно в связи с обсуждением «демона Максвелла». Последний, открывая и закрывая дверцу в стенке между двумя сосудах в зависимости от того, с какой скоростью подлетает молекула к дверце, может создать разность или разность давлений, не совершая работы, нарушая второй закон термодинамики. В этом случае демону необходим приток информации. Пределы нарушения демоном второго закона термодинамики ограничены величиной приходящей информации. Это можно утверждать не только качественно, но и количественно, согласно закону $dH + dI \geq 0$, т. е. в виде точного количественного закона. Обозначим через dQ количество теплоты, прошедшее из термостата. Запишем изменение энтропии термостата в виде $dH_T = -\frac{dQ}{T}$. По первому закону термодинамики $dA = dQ - dU$ где $U = M[E]$ – внутренняя энергия системы, связанная со свободной энергией F известным соотношением $U = F + TH_x$. Дифференцируя последнее соотношение, имеем $dF = dU - TH_x$. Второй закон термодинамики имеет в этом случае вид $dH_T + dH_x \geq 0$, $TH_x - dQ \geq 0$, что эквивалентно соотношению $dA \leq -dF$. Указанный энергетический переход совершается без изменения температуры системы. Это имеет место вследствие притока тепловой энергии из термостата, контакт с которой не должен прерываться. Тогда источником уходящей из системы механической энергии будет тепловая энергия термостата, которая будет превращаться в механическую работу.

Таким образом, если физическая система изолирована в тепловом отношении и о ней имеется количество информации I , то в ней возможны только такие процессы, для которых изменение суммарной энтропии превосходит $(-I): \Delta H \geq -I$. При этом нижняя граница физически достижима. Под тепловой изоляцией имеется в виду, что тепловая энергия, которую при указанных процессах можно превратить в работу, берется из самой системы, т. е. термостат включен в данную систему.

Второй закон термодинамики, как известно, нарушается для процессов, связанных с тепловыми флуктуациями, т. е. является асимптотическим и не вполне точным. Можно дать уточненную формулировку: в теплоизолированной системе не могут происходить процессы, для которых приращение энтропии $\Delta H \ll -1$. Если брать энтропию в термодинамических единицах, то вместо 1 следует поставить постоянную Больцмана k . Тогда последнее соотношение примет вид $\Delta H \ll -k$. Соответственно в уточненной формулировке запрещены процессы, для которых $\Delta H + I \ll -1$ или $\Delta H_{\text{физ}} + kI \ll -k$. Член с I здесь существенен, если $I \gg 1$.

³ Стратонович Р.Л. Теория информации. – М.: Советское Радио. – 1975.

Дальнейшие исследования уточнили роль квантового второго закона термодинамики в квантовой теории информации и взаимосвязь понятий работы диссипативных процессов с понятиями относительного количества информации Фишера, а также связи понятия производимой работы с количеством приходящей информации^{4,5,6,7,8,9,10,11,12,13} (см. Приложение).

Таким образом, уравнения (1) и (2) включают в себя перечисленные возможности применения физической или информационной энтропий в качестве полезного ресурса для достижения глобальной робастности ИСУ. Данные вопросы рассмотрены в Части 4 и 5 данной работы. Здесь рассмотрим обобщение уравнений (1) и (2) на случай когнитивной интеллектуальной системы управления, представленной на рис. 5.

Информационно-термодинамический анализ когнитивной интеллектуальной системы управления

Обобщением уравнений (1) и (2) является следующая система уравнений:

$$\underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{устойчивость}} = \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, k(S_{oy} - (S_{Tp} + S_{Kp})), u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{(S_{oy} - (S_{Tp} + S_{Kp})) \cdot (\dot{S}_{oy} - (\dot{S}_{Tp} + \dot{S}_{Kp}))}_{\text{робастность}} \leq 0, \quad (3)$$

$$\underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{устойчивость}} = \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, k(H_{oy} - (H_{Tp} + H_{Kp})), u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{(H_{oy} - (H_{Tp} + H_{Kp})) \cdot (\dot{H}_{oy} - (\dot{H}_{Tp} + \dot{H}_{Kp}))}_{\text{робастность}} \leq 0, \quad (4)$$

где $(S_{Tp} + S_{Kp})$ и $(H_{Tp} + H_{Kp})$ означают суммарные термодинамические и информационные энтропии технического и когнитивного регуляторов соответственно.

Из уравнения (3) следует, что робастность интеллектуальной системы управления возможно повысить за счет производства энтропии когнитивного регулятора, который уменьшает потери полезного ресурса, а уравнение (4) показывает, что негэнтропия когнитивного регулятора снижает требования к минимуму исходной информации для достижения робастности. При этом информация, основанная на знаниях в БЗ когнитивного регулятора, позволяет получить дополнительный ресурс для полезной работы, что эквивалентно появлению целенаправленного действия на объект управления для гарантированного достижения цели управления.

Рассмотрим подробнее данные утверждения на основе анализа взаимоотношений между количеством информации и извлекаемой на ее основе полезной работы и свободной энергии.

⁴ Brandao F. G.S.L., Horodecki M., Hueli H., Ng Y., Oppenheim J. and Wehner S. The second laws of quantum thermodynamics // arXiv:1305.5278v1 [quant-ph] – 22 May 2013.

⁵ Sagawa T. Thermodynamic and logical reversibilities revisited // arXiv: 1311.1886v1 [cond-mat.stat-mech] – 8 Nov 2013.

⁶ Yamano T. Phase space gradient of dissipated work and information: A role of relative Fisher information // arXiv: 1311.2176v1 [cond-mat.stat-mech] – 9 Nov 2013.

⁷ Ilgin I. and Yang I-Sh. Energy carries information // arXiv:1402.0878v1 [hep-th] – 4 Feb 2014.

⁸ Horowitz J. M., Esposito M. Thermodynamics with continuous information flow // arXiv:1402.3276v2 [cond-mat.stat-mech] – 14 Feb 2014.

⁹ Renes J. M. Work Cost of thermal operations in quantum and nano thermodynamics // arXiv:1402.3496v1 [math-ph] – 14 Feb 2014.

¹⁰ Horowitz J., M. Sagawa T. Equivalent definitions of the quantum nonadiabatic entropy production // arXiv:1403.7778v1 [quant-ph] – 30 Mar 2014.

¹¹ Lang A.H., Fisher Ch.K. and Mehta P. Thermodynamics of statistical inference by cells // arXiv:1405.4001v1 [physics.bio-ph] – 15 May 2014.

¹² Apollaro T. J. G., Francica G., Paternostro M. and Campisi M. Work statistics, irreversible heat and correlations build-up in joining two spin chains // arXiv: 1406.0648v1 [cond-mat.stat-mech] – 3 Jun 2014.

¹³ Hemmo M and Shenker O. Entropy and computation: The Landauer-Bennett thesis reexamined // Entropy. – 2013. – Vol. 15. – Pp. 3297-3311.

Как отмечалось выше, если наблюдателю в виде демона Максвелла доступны микроскопические степени свободы, то второй закон термодинамики может быть нарушен. Сцилард показал из анализа модели демона Максвелла, что из термодинамического цикла извлекается работа в виде $kT \ln 2$. Более того¹⁴, было показано, что извлекаемая работа W_{ext}^S из системы определяется количеством информации (или квантово-классической взаимной информацией) I , которая измеряет знания о системе при измерении. Одновременно подобное соотношение в виде нижней границы существует для полной стоимости W_{cost}^M измерения и стирания информации $W_{ext}^S \leq -\Delta F^S + kTI$ и $W_{cost}^M \geq kTI$, где ΔF^S определяет свободную энергию системы. Тогда нетрудно заметить, скорость извлекаемой работы \dot{W}_{ext} ограничена величиной $\dot{W}_{ext} \leq kT\dot{I}$, т. е. ограничена скоростью извлекаемой информации¹⁵.

Более значимым является факт, что усредненная величина произведенной работы силами диссипации $\frac{\langle W_{diss} \rangle}{kT} = S_{KL}(P_F \| P_B)$, т. е. работа сил диссипации определяется дивергенцией Кульбака-Лейблера для вероятностных распределений P_F, P_B . Отметим, что левая часть данного соотношения представляет физически тепловую энергию, а правая часть определяет чисто информацию о системе.

Информационная энтропия является мерой количества информации о системе и расхождения Кульбака – Лейблера, а также определения количества информации Фишера (см. Приложение).

Аналогичная зависимость существует между работой, произведенной силами диссипации, и расхождением Реньи [30].

Таким образом, подставляя в (3) и (4) приведенные соотношения между информацией и извлекаемой свободной энергией и работы получаем отмеченный выше вывод, что робастность интеллектуальной системы управления возможно повысить за счет производства энтропии когнитивного регулятора, который уменьшает потери полезного ресурса объекта управления, а негэнтропия когнитивного регулятора снижает требования к минимуму исходной информации для достижения робастности. Поэтому извлекаемая информация, основанная на знаниях в БЗ когнитивного регулятора, позволяет получить дополнительный ресурс для полезной работы, что эквивалентно появлению целенаправленного действия на объект управления для гарантированного достижения цели управления.

Следовательно, физический закон самоорганизации знаний [1] и информационный анализ квантового количества извлеченной скрытой информации из классических состояний сигналов управления [2] дает возможность сопоставить количеству извлеченной информации энергетический эквивалент в виде дополнительного производства полезной работы. Извлеченное производство полезной работы в результате дает скрытый ресурс для совершения полезного действия, в частности достижения глобальной робастности и качества управления.

Введенное информационно-термодинамическое уравнение для когнитивного и интеллектуального управления связывает извлеченное количество скрытой информации с количеством возможной произведенной энергии, а количество произведенной энергии связано прямым уравнением с количеством произведенной полезной работы. Этот факт дает обоснование принципу минимума требуемой исходной информации и расхода полезного ресурса интеллектуального управления для гарантированного достижения цели управления. Тогда когнитивный регулятор, встроенный в контур управления, позволяет перейти от самоорганизации к саморазвитию с обобщением информационно-термодинамического уравнения на когнитивные саморазвивающиеся процессы. В результате возможно построить ИТ проектирования самоорганизующихся и саморазвивающихся ИСУ. Отметим, что образовательный процесс, основанный на извлечении новых знаний, может описываться по аналогии с данной ИТ.

Выводы

¹⁴ Sagawa T, Ueda M. Minimal Energy Cost for Thermodynamic Information Processing: Measurement and Information Erasure // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 102. – No 25. – Pp. 250602. – Erratum. Phys. Rev. Lett. 106, 189901. – 2011.

¹⁵ Horowitz J. M., Sandberg H. Second-law-like inequalities with information and their interpretations // New Journal of Physics. – 2014. – Vol. 16. – P. 125007.

Приведенные информационно-термодинамические отношения между информацией, извлекаемой на ее основе полезной работы и мерами качества когнитивного интеллектуального управления позволяют сделать следующие выводы:

- робастность интеллектуальной системы управления возможно повысить за счет дополнительного производства энтропии когнитивного регулятора, который уменьшает и компенсирует потери полезного ресурса;
- негэнтропия когнитивного регулятора снижает требования к минимуму исходной информации для достижения робастности;
- информация, основанная на знаниях в БЗ когнитивного регулятора, позволяет получить дополнительный ресурс для полезной работы, что эквивалентно появлению целенаправленного действия на объект управления для гарантированного достижения цели управления.

Приложение. Термодинамика информационных процессов и взаимосвязь мер количеств информации Фишера, энтропии Шеннона и расхода Кульбака-Лейблера

Предварительно рассмотрим некоторые важные аспекты применения информационно-термодинамических оценок в задачах анализа интеллектуальных систем.

В данном разделе рассмотрим простые примеры вывода широко применяемых мер информационной энтропии Шеннона и количества информации Фишера.

Информационная энтропия Шеннона. Напомним, что само понятие «информация» в теории Шеннона, которое применялось ранее, не ассоциируется с индивидуальным сообщением, а характеризует источник сообщений. Идея о статистической природе источника позволяет упростить описание пропускной способности канала передачи информации, воспроизводимой источником сообщений. Рассмотрим ансамбль $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ алфавита x_i , появляющегося в сообщении с вероятностью $p(x_i)$. Ансамбль сообщений состоит из большого числа N . Для каждого сообщения типовая последовательность букв алфавита x_i содержит $Np(x_i)$ букв, $Np(x_j)$, из x_j и т. д. Число таких различных типовых последовательностей букв сообщений определяется комбинаторикой как $\frac{N!}{Np(x_1)!Np(x_2)! \dots Np(x_n)!}$ и применяя формулу Стирлинга получим аппроксимацию данного выра-

жения в виде $2^{NH(X)}$, где $H(X) = -\sum_i^n p(x_i) \log p(x_i)$ является информационной энтропией Шеннона.

При $N \rightarrow \infty$ вероятность появления нетипичной последовательности стремится к нулю и поэтому достаточно рассматривать типовой ансамбль $2^{NH(X)}$ типовых равновероятных типовых последовательностей сообщений. Таким образом, ансамбль из N букв алфавита может быть сжат до $NH(X) \leq N \log n$ бит (теорема о сжатии Шеннона).

Соотношение неопределенности и информация Фишера. Рассмотрим процесс измерения координаты x для упрощения в одномерном пространстве. Результат многократного измерения данной величины можно охарактеризовать средними значениями как $\langle x \rangle = \int xp(x, t)dx$, $\langle x^2 \rangle = \int x^2 p(x, t)dx$, где интегрирование осуществляется по всему пространству значений измеряемой величины и $p(x, t) \geq 0$ при условии нормировки функции плотности распределения вероятностей $\int p(x, t) = 1$ и $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} x^n p = 0$, $n = 0, 1, 2$. Проинтегрируем по частям условие нормирования функции $p(x, t) \geq 0$ и получим $x p \Big|_{x=-\infty}^{+\infty} - \int x \frac{\partial p}{\partial x} dx = 1$.

Примем за нулевое значение первый член, согласно ранее принятому предположению и получим условие $\int x \frac{\partial p}{\partial x} dx = -1$. Положим теперь, что $u = x\sqrt{p}$ и $\vartheta = \frac{1}{\sqrt{p}} \frac{\partial p}{\partial x}$. Из известного неравенства Шварца $(u, u)(\vartheta, \vartheta) \geq |(u, \vartheta)|^2$ получим соотношение «неопределенности» в виде $\langle x^2 \rangle I \geq 1$, где величина $I = \int \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 dx$ и называется информацией Фишера.

Соотношение между дивергенцией, информационной энтропией Шеннона и количеством информации Фишера. Допустим, что X является случайной величиной с заданной (в общем случае не гауссовской) плотностью распределения вероятностей и конечной величиной дисперсии. Пусть $X_t = X + \sqrt{t}Z$, где Z случайная величина, имеет стандартное нормальное распределение, независимое от X .

Тогда имеем следующее соотношение между информационной энтропией Шеннона и количеством информации Фишера¹⁶:

$$H(X) = \frac{1}{2} \log(2\pi e) - \frac{1}{2} \int_0^\infty \left[I(X_t) - \frac{1}{1+t} \right] dt.$$

Обозначим относительную энтропию (расхождение Кульбака – Лейблера) для плотности вероятностей $p(x)$ относительно нормальной $q(x)$ с тем же средним значением и дисперсией как и у $p(x)$ в виде $S(X) = \int p(x) \log \left[\frac{p(x)}{q(x)} \right] dx$. Относительная энтропия не симметричная функция и поэтому не обладает свойством метрики (расстояния), а измеряет отклонение $p(x)$ от $q(x)$. Если среднее $E[X] = f$ и $\text{var } X = \sigma^2$, то имеем:

$$\begin{aligned} S(X) &= \int p(x) \log p(x) dx - \int p(x) \log q(x) dx = -H(X) - \int p(x) \left[\sigma^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} - \frac{(x-a)^2}{2\sigma^2} \right] dx \\ &= \frac{1}{2} [\log(2\pi\sigma^2) + 1] - H(X). \end{aligned}$$

Таким образом, относительная энтропия определяет отличие информационной энтропии Шеннона случайной величины X от нормального закона. При $p(x)$ равном $q(x)$ величина $S(X)$ равна нулю, т.е. нормальное распределение имеет при заданной дисперсии максимальную величину.

Для случайной величины X с определенными ранее параметрами обобщенная стандартная мера количества информации Фишера определяется как

$$\Phi(X) = \sigma^2 E \left[\frac{p'(X)}{p(X)} - \frac{q'(X)}{q(X)} \right]^2 \text{ и } S(X) = \frac{1}{2} \int_t^1 -\Phi(\sqrt{t}X + \sqrt{1-t}Y) dt.$$

Тождество de Bruijn определяет соотношение между энтропией Шеннона и количеством информации Фишера в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} h_e(X + \sqrt{t}Z) = \frac{1}{2} I(X + \sqrt{t}Z),$$

где $h_e = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx$ означает дифференциальную энтропию Шеннона по основанию e . В частном случае в пределе $t \rightarrow 0$ имеем из приведенного выражение

¹⁶ Madiman M., Barron A. Generalized entropy power inequalities and monotonicity properties of information // IEEE Transactions on Information Theory. – 2007. – Vol. 53. – №7. (arXiv: cs / 0605047 [cs. IT]).

$$\left. \frac{\partial}{\partial t} h_e(X + \sqrt{t}Z) \right|_{t=0} = \frac{1}{2} I(X).$$

Тождество de Bruijn для дивергенции Кульбака – Лейблера и относительной информации Фишера имеет вид: $\frac{d}{dt} S(p|q) = -\frac{1}{2} \Phi(p|q)$. Для меры относительной энтропии Реньи типа [30]

$$D_\alpha(P\|Q) = \frac{1}{1-\alpha} \log \int \left(\frac{P}{Q} \right)^{\alpha-1} dP, \quad \alpha > 0, \quad P \ll Q$$

имеем $\frac{d}{d\delta} D_\alpha(P\|Q) \Big|_{\alpha=0} = -\frac{\alpha}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\nabla \log \frac{p(z)}{q(z)} \right)^2 \frac{p^\alpha(z) q^{1-\alpha}(z)}{\int_{-\infty}^{\infty} p^\alpha(u) q^{1-\alpha}(u) du} dz$ при условии

$\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{d}{dz} [p^\alpha(z) q^{1-\alpha}(z)] = 0$. Для более обобщенных мер типа $I_f(P\|Q) = \int f \left(\frac{dP}{dQ} \right) dQ$ имеет место соотно-

ношение¹⁷ $\frac{d}{d\delta} I_f(P\|Q) \Big|_{\delta=0} = -\frac{1}{2} \int q(y) f'' \left(\frac{p(y)}{q(y)} \right) \left(\nabla \frac{p(y)}{q(y)} \right)^2 dy$.

Имеет также место соотношение $\left| \frac{dS}{dt} \right| \leq \gamma \sqrt{I}$, т. е., скорость производства информационной энтропии определяется количеством информации Фишера. Для диффузионных процессов имеем $\frac{dS}{dt} = I \geq 0$ и $\frac{d^2 S}{dt^2} = \frac{dI}{dt} \leq 0$. Тогда имеем $S(t=0) \leq S(t) \leq S(t=0) + (t-t_0)I(t=0)$.

Относительное количество информации Фишера можно определить как

$$D_{RFI}(f\|g) = \int f \left| \nabla_\Gamma \left(\ln \frac{f}{g} \right) \right|^2 d\Gamma,$$

что определяет соотношение с произведенной работой диссипативных сил в виде

$$D_{RFI}(f\|g) = \beta^2 \langle |\nabla_\Gamma| W_{diss}(\Gamma) \rangle_f$$

и эквивалентно усредненной величине произведенной работы силами диссипации $\frac{\langle W_{diss} \rangle}{kT} = S_{KL}(P_F\|P_B)$, определенной через дивергенцию Кульбака – Лейблера или расхождение Реньи.

Список литературы

6. Ульянов С., Албу В., Бархатова И. Квантовая самоорганизация баз знаний: Технологии квантовых вычислений и квантового программирования. – LAP LAMBERT Academic Publ. – 2014.
7. Ульянов С., Албу В., Решетников А. Квантовый оптимизатор баз знаний: Интеллектуальные самоорганизующиеся робастные встраиваемые контроллеры и системы управления. – LAP LAMBERT Academic Publ. – 2014.
8. Ульянов С., Албу В., Решетников А. Интеллектуальные системы управления в непредвиденных ситуациях управления: Оптимизатор баз знаний на мягких вычислениях. – LAP LAMBERT Academic Publ. – 2014.

¹⁷ D. Guo, Relative entropy and score function: New information - estimation relationships through arbitrary additive perturbation // ISIT 2009. – Seoul, Korea. – 2009. – Pp. 814-818.

9. Ulyanov S. V. Soft computing optimizer of intelligent control system structures // Patent US № 7,219,087 B2. – 2007.
10. Ulyanov S. V. System for soft computing simulation // Patent US No 2006 / 0218108 A1. – 28.09.2006.
11. Ulyanov S. V. Self-organizing quantum robust control methods and systems for situations with uncertainty and risk // Patent US 2013 / 0096698 A1. – 18.04.2013.
12. Nagamachi M. Kansei / Affective engineering. – CRC Press Taylor & Francis Group. – 2011.
13. Cohn R. Kansei engineering. – VSD (Omniks). – 2013.
14. Dai Y. , Chakraborty B. , Shi M. Kansei engineering and soft computing: Theory and practice. – CRC Press Taylor & Francis Group. – 2010.
15. Ulyanov S. V. Intelligent self-organized robust control design based on quantum/soft computing technologies and Kansei Engineering // Computer Science J. of Moldova. – 2013. – Vol. 21. – № 2(62). – Pp. 242-279.
16. Po-Lei Lee, Hsiang-Chih Chang, Tsung-Yu Hsieh, Hua-Ting Deng, Chia-Wei Sun. A Brain-wave-actuated small robot car using ensemble empirical mode decomposition-based approach // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics – Part A: systems and humans. – 2012. – Vol. 42. – № 5. – Pp. 1053-1064.
17. Becedas J. Brain–Machine Interfaces: Basis and advances // IEEE transactions on systems, man, cybernetics – Part C: Applications and reviews. – 2012. – Vol. 42. – №. 6. – Pp. 825-836.
18. Sadeghieh A. , Roshanian J. , Najafari F. Implementation of an intelligent adaptive controller for an electrohydraulic servo system based on a brain mechanism of emotional learning // Intern. J. of Advanced Robotic Systems (INTECH). – 2012. – Vol. 9. – Pp. 1-12.
19. A. J. Shackman, T. V. Salomons, H. A. Slagter et all. The integration of negative affect, pain and cognitive control in the cingulate cortex // Nature Reviews: Neuroscience. – 2011. – Vol. 12. – Pp. 154-167.
20. Hua Cai, Yingzi Lin. Coordinating cognitive assistance with cognitive engagement control approaches in human–machine collaboration // transactions on systems, man, and cybernetics – Part A: systems and humans. – 2012. – Vol. 42. – №2. – Pp. 286-294.
21. Vernon D. , von Hofsten C., Fadiga L. A Roadmap for cognitive development in humanoid robots. Cognitive systems monographs. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg – Vol. 11. – 2010. – P. 227.
22. Changyun Wei, Koen V. Hindriks. An Agent-Based Cognitive Robot Architecture // M. Dastani, J. F. Hubner, B. Logan (Eds.): ProMAS 2012. – LNAI 7837. – Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg, 2013. – Pp. 54-71.
23. Kitajima M.. Toyota M. Decision-making and action selection in two minds: An analysis based on model human processor with real time constraints (MHP/RT) // Biologically Inspired Cognitive Architectures. – 2013. – Vol. 5. – Pp. 82-93.
24. Anguera J. A., Boccanfuso J., Rintoul J. L., Al-Hashimi O., Faraji F., Janowich J. , Kong E., Larraburo Y. , C. Rolle, Johnston E., Gazzaley A. Video game training enhances cognitive control in older adults // Nature. – 2013. – Vol. 501. – Pp. 97-101.
25. Weng J., Luciw M. D. , Zhang Qi. Brain-like emergent temporal processing: Emergent open states // IEEE Transactions on Autonomous Mental Development. – 2013. – Vol. 5. – №. 2. – Pp. 82-116.
26. Dong D., Chen Z.-L., Chen Z.-H., Zhang C.-B. Quantum mechanics helps in learning for more intelligent robots // Chin. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 23. – № 7. – Pp. 1691-1694.
27. Lukac M. , Perkowski M. Inductive learning of quantum behaviors // Facta Universitatis. – 2007. – Vol. 20. – № 3. – Pp. 561-586.
28. Kagan E., Gal I Ben. Navigation of quantum-controlled mobile robots // Recent Advances in Mobile Robotics. – Ch. 15, In Tech. –2011. – Pp. 311-220.

29. Bannikov A. , Egerton S. , Callaghan V. , Jonson B. D. , Shaukat M. Quantum computing: Non – deterministic controllers for artificial intelligent agents // Proc. 5th Intern. Wokshop Artif. Intell. Techniques for Ambient Intelligence (AITAm'10). – Kuala Lumpur, Malasia. – 2010.
30. Chatzis S. P., Korkinof D., Demiris Y. A quantum-statistical approach toward robot learning by demonstration // IEEE Transactions on Robotics. – 2012. – Vol. 28. – № 6. – Pp. 1371-1381.
31. Chen F., Hou R., Tao G. Adaptive controller design for faulty UAVs via quantum information technology // Intern. J. of Adv. Robotic Systems (In Tech). – 2012. – Vol. 9. – Pp. 256:2012.
32. Gyongyosi L., Imre S. Quantum cellular automata controlled self-organizing networks, Cellular automata // Innovative Modelling for Science and Engineering / Dr. A. Salcido (Ed.). InTech. – 2011.
33. Kim Y. H. , Kim J. H. Multiobjective quantum-inspired evolutionary algorithm for fuzzy path planning of mobile robot // IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2009). – 2009. – Pp. 1185-1192.
34. Kim S. S. , Choia H. J. , Kwak K. Knowledge extraction and representation using quantum mechanics and intelligent models // Expert Systems with Applications. – 2012. – Vol. 39. – № 3. – Pp. 3572-3581.
35. Halpern N. Y., Garner A. J. P., Dahlsten O. C. O., Vedral V.. What's the worst that could happen? One-shot dissipated work from Renyi divergences // arXiv:1505.06217v1 [cond-mat.stat-mech] – 22 May 2015.