

## О ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВАХ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

*В статье рассмотрены главные принципы, положенные в основу исследования сложных систем. Уделено внимание обоснованию системотехники физическими постулатами.*

*Макалада татаал системаларды изилдөөнүн негизине коюлган башкы принциптер каралган. Системотехниканы физикалык постулаттар менен негиздөөгө көңүл бурулган.*

*The article describes the basic principles underlying the study of complex systems. Removed account substantiation systems engineering physical postulates.*

Одной из главных проблем современной математики является разработка и внедрение в практику методов исследования динамики функционирования сложных систем.

В общем случае сложная система является многоуровневой конструкцией из взаимодействующих элементов, объединяемых в подсистемы различных уровней [1].

По мере увеличения сложности систем комплексные «общесистемные» проблемы приобретают все большее значение. Для объектов большого масштаба определяющую роль играет структура системы, организация взаимодействия между ее частями, отношения с внешней средой, централизация управления различными средствами и др. При этом отодвигается на второй план физическая сущность процессов, протекающих в системе; с «общесистемной» точки зрения малосущественно, идет ли речь о машиностроительном предприятии, химическом реакторе или комплексе электронной аппаратуры. Изучение комплексных «общесистемных» проблем выделилось в самостоятельное направление инженерной мысли, получившее название системотехники [3].

Любые принципы основаны на опыте и общественном соглашении, это касается и принципов системотехники. Опыт исследования объектов различного состава, содержания и области применения (физических, технических, биологических, эргатических, мысленных конструкций и т.д.) позволяют сформулировать три основных принципа системотехники, которые можно положить в основу исследования, использования и создания сложных систем:

- 1) принцип физичности;
- 2) принцип моделируемости;
- 3) принцип целенаправленности.

Принцип физичности: всякой системе (независимо от ее природы) присуши

физические законы (закономерности), возможно уникальные, определяющие внутренние причинно-следственные связи, существование и функционирование. Никаких других законов (кроме физических) для объяснения действия систем любой природы (в том числе живых) не требуется.

Принцип физичности включает несколько постулатов (см. рис.).

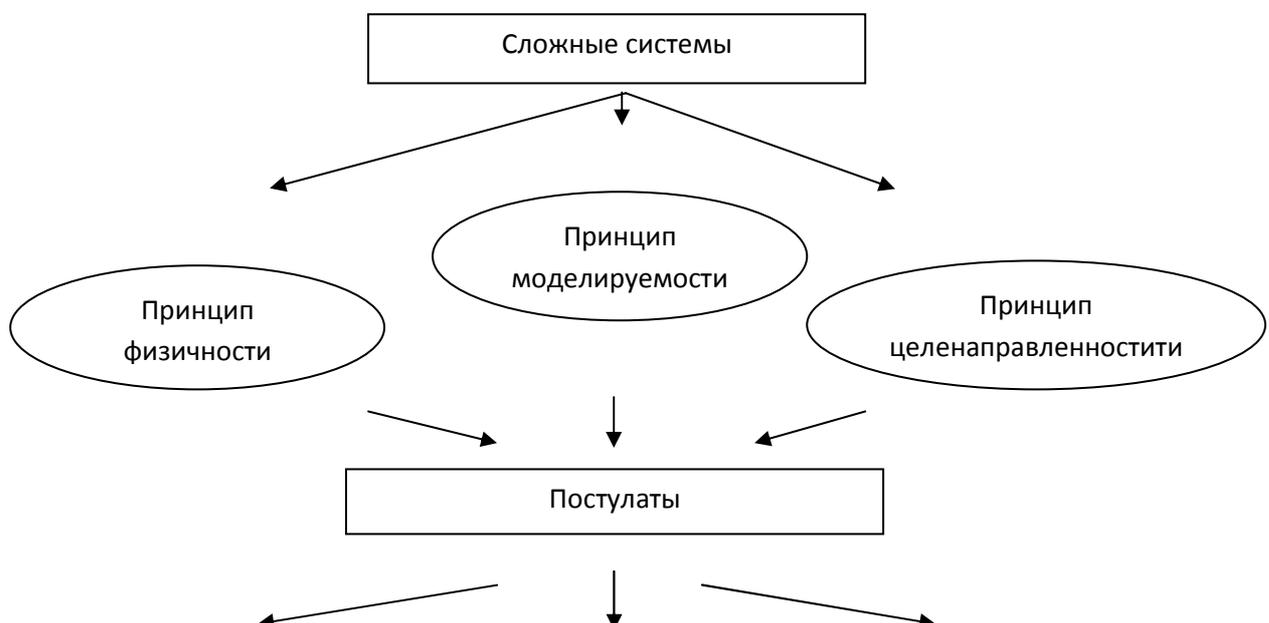
*Постулат целостности:* сложная система должна рассматриваться как единое целое. Понятие целостности основывается на специфическом свойстве или группе свойств.

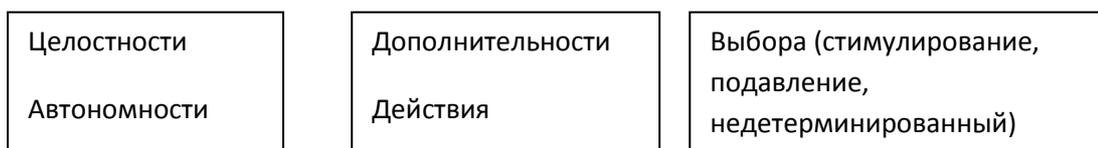
За последние десятилетия категория «что из чего состоит» получила в физике новое истолкование. Две частицы, взаимодействуя, рожают большее число частиц, каждая из которых имеет массу покоя большую, нежели обе исходные частицы. Представление о том, что «более сложное» или «большее» состоит из частей «менее сложных» и «меньших» потеряло смысл. При организации в систему однотипных подсистем происходит объединение некоторых свойств подсистем, усиливающих положительное проявление этих свойств, но это не простое арифметическое сложение. При определенном уровне усиления одних и ослабления других свойств превалирующее значение приобретает новое общесистемное свойство, возникающее вследствие взаимодействия компонентов.

Один из аспектов постулата целостности состоит в том, что ни при композиции, т.е. объединении подсистем в систему, ни при декомпозиции, т.е. членении системы (в любом из вариантов), недопустима потеря понятий. При исследовании компонентов недопустимо элиминирование целостных (систем) понятий.

Сущность постулата целостности состоит в том, что композиция и декомпозиция должны осуществляться в направлении генерирования характеризующей систему информации более высокого качества.

Выявление целостности требует учета всех взаимосвязей внутри системы, а также системы со средой. Необходимо выявить системное свойство, его содержание, механизм образования, факторы, которые препятствуют его появлению или снижают его уровень. Необходимо понять, какие свойства подсистем подавляются общесистемным свойством, каков механизм этого подавления и в каких условиях он теряет силу.





*Рис. Принципы и физические постулаты, положенные в основу создания сложных систем.*

Применение постулата целостности состоит в раскрытии и накоплении сведений о системных свойствах на всех этапах исследования и в обобщении их в понятия, а затем - в применении этих понятий к подсистемам при исследовании их порознь после декомпозиции. Рациональность декомпозиции оценивается на основании определения целостности: если декомпозиция неудачна, системные и подсистемные понятия невозможно увязать, между ними теряется преемственность, они неустойчивы и производят случайное впечатление. Можно механическое движение разложить в ряд по времени, как это принято, а можно, например, по ускорению. Второе законно, но бесполезно, поскольку понятия, связанные с каждым из членов ряда, не будут объединены ни физической теорией, ни опытом. Эта декомпозиция будет восприниматься как случайная, пока не обнаружится взаимная зависимость системного понятия «движение» с понятиями, характерными для всех членов ряда.

*Постулат автономности.* В соответствии с Эрлангенской программой различные классы физических явлений могут быть поставлены в соответствие различным группам преобразований, каждая группа порождает свою геометрию. Таким образом, реализация этой программы основана на применении теоретико-групповых методов к созданию фундаментальных и прикладных теорий. И хотя «геометризация» физики не завершена, можно утверждать, что геометрическому представлению сложных систем свойственна всеобщность и глубина.

Различие геометрий становится различием классов систем, и это различие имеет четкий формальный признак – другую группу преобразований. Предполагая, что интересующая нас система расположена в адекватном ей геометрическом пространстве (реальном, функциональном, мыслимом) и ограничиваясь метрическими пространствами, мы должны каждому классу систем (конкретной системе) приписать метрику, определяемую соответствующей группой преобразований. Это – автономная метрика системы, либо автономная группа преобразований.

Метрика связана с понятием расстояния между элементами системы. Мы привыкли к евклидовой метрике, иногда измеряя расстояние по прямой, а иногда по дуге (в геодезии и навигации – по ортодромии). Метрики Вселенной, поверхности Земли и плоской поверхности различны. Если бы классическая геометрия не утвердилась ранее, чем был постигнут факт сферичности Земли, на пути создания метрик Евклида, Лобачевского, Римана было бы еще больше терний. Даже неудачный выбор начала координат может изрядно запутать дело. Система Птолемея возникла из антропоцентризма, в силу чего

выбрана геоцентрическая система координат вместо гелиоцентрической. В результате модели движения небесных тел были сложными, путанными и несовместными. Потребовались гений и мужество Коперника, чтобы исправить эту методологическую ошибку, упростить модель и открыть законы движения планет.

Сложные системы имеют автономную пространственно-временную метрику, для них существует автономное расстояние и автономное время (либо автономную группу преобразований). Релятивистское время высокоэнергетических частиц – только один пример автономной метрики. Познание сложных систем требует расширения релятивистских категорий и распространения их на различные формы движения. Одни и те же физико-химические процессы протекают в различных системах с различной скоростью, поэтому их естественной мерой времени должно стать течение некоторого определяющего внутреннего процесса, а не внешнего (движение Земли вокруг Солнца). Сложные системы могут иметь локальный масштаб времени, отличный от астрономического. Для развивающихся систем он может быть различным на различных этапах развития.

Физический релятивизм является фундаментом современной науки. Системотехнический релятивизм носит модельный характер. Нет оснований утверждать, что на всех без исключения сложных системах ход времени отличается от астрономического. Внутренняя мера времени вводится как средство исследования и познания, без которого невозможно обойтись в формализации описания системы. Затем устанавливается физическая реальность автономного времени. Биологическая метрика находится в стадии исследования и не имеет столь элементарного описания, как в геометрии и физике. Поскольку каждый класс физических явлений отождествляется с определенным набором инвариантов, каждая группа преобразований и порожденная ею геометрия соответствует этому же набору.

Некоторые инварианты или функции от них изменяются при взаимодействии подсистем, сохраняя значение постоянным и допуская только его перераспределение между подсистемами. Тогда говорят, что соответствующая физическая величина подчиняется закону сохранения. Скорость – инвариант, но закона сохранения скорости нет. Однако произведение массы на квадрат скорости не изменяется ни при каких взаимодействиях: это закон сохранения энергии.

Но существуют и более узкие, внутрисистемные «законы сохранения», определяемые устройством системы. В солнечной системе (при точечном представлении ее подсистем – Солнца и планет) площади, описываемые радиусами-векторами планет (в гелиоцентрической системе координат), сохраняются постоянными. Это закон Кеплера. Как и всякий закон, он связан с определенной идеализацией [2] (не учитывает возмущающего влияния сторонних тел) и справедлив только в пределах этой идеализации. Значимость автономных законов, т.е. их влияние на основные общесистемные свойства, различна.

*Принцип моделируемости.* Сложная система представима конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности. Этот важный принцип дает возможность исследовать определенное свойство или группу свойств сложной системы при помощи одной или нескольких упрощенных (узкоориентированных) моделей. Модель, ориентированная на определенную группу свойств сложной системы, всегда проще самой системы. Создание полной модели для сложной системы вообще бесполезно, так как в силу теоремы Тьюринга, такая модель будет столь же сложной, как и система. Ориентированная модель строится на основании измерений, которые всегда ограничены. Однако можно ли полагать, что ориентированная модель будет стабильной и независимой от моделей другой ориентации? Доказательство существования и стабильности ориентированных (как угодно узко) моделей опирается на

постулат дополненности, а оценка пределов этой стабильности – на постулат неопределенности. Оба постулата являются развитием и распространением на сложные системы соответствующих принципов. Это закономерно, поскольку принцип физичности мы приняли.

*Постулат дополненности.* Сложные системы, находясь в различных средах (ситуациях), могут проявлять различные системные свойства, в том числе альтернативные, т.е. несовместимые ни в одной из ситуаций по отдельности.

Впервые физический принцип дополненности для микромира был сформулирован Н. Бором: электрон в одних взаимодействиях проявляет себя как частица (упругие столкновения), в других – как волна (диффракция). Трудно найти вид взаимодействия, при котором корпускулярные и волновые свойства электрона (или фотона) проявлялись бы одновременно. Это значит, что измерительные приборы не будут регистрировать одновременно того, что мы называем «корпускулярными» и «волновыми» свойствами. Разумеется, это может быть следствием несовершенства наших физических приборов, ориентированных на альтернативность представлений о корпускулярных и волновых свойствах. Реальность едина и процессы физического взаимодействия едины; только в силу ограниченности средств познания это единство расчленяется.

Единство свойств может быть описано обобщающей теорией (метатеорией). Применительно к микромиру такой является квантовая механика. Но квантовая механика не охватывает релятивистских свойств, следовательно, она также недостаточно обща. Более общей является релятивистская теория кванта, но и она имеет ограничения. Представления о корпускулярных и волновых свойствах наглядны, а их объединение – ввиду отсутствия наглядных аналогов – воспринимается плохо. Потребовались новые факты, чтобы пересмотреть старые представления, а также и немалые усилия, чтобы утвердить новые [5].

Расширение физического принципа дополненности на сложные системы вполне закономерно, поскольку его действие основано на системных свойствах микромира. В системотехнике постулат дополненности заставляет искать в разных ситуациях соответствующие им проявления сущности системы. Необходимость постулата дополненности связана с ограниченностью наших средств познания и отражения реальности. Природа едина и цельна, но отражение ее свойств в нашем представлении неоднозначно и ситуационно. Наблюдатель воспринимает одни грани сущности в одних условиях и другие грани сущности в других.

*Постулат действия.* Для изменения поведения системы требуется прирост воздействия, превосходящего некоторое пороговое значение. Термин заимствован из квантовой механики: переход электрона на более высокоэнергетическую орбиту требует энергии не менее кванта действия [6].

Изменение поведения сложной системы может быть связано с энергетикой, с веществом и с информацией, которые, накапливаясь, проявляют свое влияние скачкообразно, путем качественного перехода. Одновременное энерго-информационное воздействие может привести к такому же результату, как энергетическое с более высоким уровнем. Таким образом, порог есть функция трех переменных: количества определенного вещества, количества энергии определенного качества, количества определенной информации.

В атомной физике смена состояния зависит от энергии, в системотехнике появляется новый фактор: информация (энергетический вещественный обмен со средой в сложных системах довольно строго регламентированы). Именно прирост информации, для накопления которой сложная система имеет специальные средства и возможности,

определяет деятельность системы, тогда как избыток вещества или энергии может разрушить ее.

Вещественный и энергетический ресурсы сложной системы более менее стабильны, эта стабильность возрастает по мере увеличения сложности, для чего требуется анализ поступающей информации и упреждение событий. В сущности, сложные системы в нетривиальном смысле реализуют демон Максвелла. Конструктивное значение постулата действия определяется покомпонентными порогами, значения которых регулируется системой. До определенного уровня действие среды компенсируется усилением одних и ослаблением других процессов, а начиная с некоторого уровня, требуется «переустройство» системы.

*Постулат неопределенности.* Повышение точности определения (измерения) какого-либо количественного описываемого свойства сложной системы сверх некоторого предела влечет за собой понижение возможной точности определения (измерения) другого свойства – одновременно измерить значения двух (или более) параметров с точностью, превышающей определенный уровень, невозможно. Иначе говоря, существует область неопределенности, в пределах которой свойства могут быть описаны только вероятностными характеристиками.

В радиолокации точность одновременного измерения дальности и скорости цели имеет предел, зависящий от вида сигнала. В радиолокации природа неопределенности подробно исследована, построены функции неопределенности, найдены технические пути ее «сжатия». Проникновение в глубину явления исключило феномен, но принцип сохранился.

Физическая причина неопределенности состоит в том, что измеряемая величина (количественное выражение свойства) влияет на внутрисистемный инвариант. Например, физической константой является постоянная Планка. Поскольку частица «не воспринимает» воздействия ниже порогового, импульс, значение которого меньше определенного уровня, не в состоянии изменить координату частицы. Поэтому измерить этот импульс посредством измерения приращения координаты невозможно. С другой стороны, если имеется прямой способ измерения абсолютного значения импульса (превосходящего порог) с очень высокой точностью, эту точность нельзя увязать с изменением координаты, поскольку последнее будет ограничено порогом действия.

*Принцип целенаправленности.* Этот принцип определяет особое место и роль сложных систем. Целенаправленность в системотехнике мы будем понимать как функциональную тенденцию, направленную на достижение системой некоторого состояния, либо на усиления (сохранение) некоторого процесса. При этом система оказывается способной противостоять внешнему воздействию, а также использовать среду и случайные события.

Следствием принципа целенаправленности является постулат выбора. Сложные системы обладают способностью к выбору поведения, и следовательно, однозначно предсказать способ действия и экстраполировать их состояние невозможно ни при каком априорном знании свойств системы и ситуации.

Сложная система строит свое поведение в существенной (хотя и неоднозначной) связи с ситуацией. Следовательно, на это поведение можно влиять. Можно ожидать, что степень неоднозначности зависит от ситуации, т.е. внешних связей. Более того, не исключено, что в определенных условиях неоднозначность исчезнет. Это мы и наблюдаем, причем на системе самой высокой сложности – на человеке. «Единственная,

неповторимая, яркая» человеческая индивидуальность ведет себя «почти» определенно и предсказуемо в определенных условиях.

*Постулат выбора* позволяет сложной системе в соответствии с ее целенаправленностью использовать редкие благоприятные события, возникающие во взаимодействии со средой, блокируя остальные (неблагоприятные) события и процессы.

Принципы физичности, моделируемости, целенаправленности достаточно полно отражают методологию системного подхода. Принцип физичности предписывает причинно-следственные связи объектам любой природы и системам, построенным из этих объектов. формализация связей и определяемых ими автономных законов позволяет выразить на едином языке многоязычное описание объектов (подсистем). Если автономных законов нет, совокупность объектов не образует системы, тогда это хаотический набор компонентов.

Принцип моделируемости обеспечивает возможность использования в системотехнике упрощенных моделей, отражающих только те грани сущности сложной системы, которые интересуют исследователя. Выявление новых свойств и сущностей не обязательно должно сопровождаться построением обобщающих моделей, а может ограничиваться наращиванием библиотеки упрощенных моделей. Отражение сложной системы в целом обеспечивается взаимодействием упрощенных моделей.

*Принцип целенаправленности* распространяет практическую сторону человеческой деятельности на системы любой природы. Принцип целенаправленности позволяет сопоставить сложной системе любого содержания некоторый функционал, описывающий ее существование как целого. Поскольку модель системы отражает точку зрения исследователя, то этот функционал отражает и ее (например, учитывает полезность системы).

Совокупность принципов системотехники не только формирует единство в методах исследования и описания систем любой природы (от физических до абстрактных), но и создает концептуальную основу построения математического аппарата: на основании автономных метрики и законов сохранения строятся модели, которые оцениваются по целенаправленности.

На первый взгляд, принципы физичности и целенаправленности могут показаться несовместимыми, принцип моделируемости противоречающим постулату целостности, а вся совокупность принципов – эклектичной. Это не так. Законы физики известны достаточно хорошо – по крайней мере в той части, которая непосредственно связана с человеческими потребностями, кроме того они формализованы. Биологические и общественные системы целенаправлены, они подчиняются особым законам. Искусственные системы действуют в соответствии с закономерностями, которыми наделил их создатель. Интеллектуальные системы обладают причинно-следственной свободой, их природа от нас скрыта.

Как поступить, если исследуемая или разрабатываемая система включает в качестве подсистем все компоненты? Естественным представляется выразить свойства такой системы на формальном языке, который лучше развит. Такой подход характерен для науки: Максвелл описал электромагнитное поле (неизвестную в те времена субстанцию) на языке механики, в дальнейшем механические аналогии исчезли, а уравнения действуют

до настоящего времени. «Субстанция» сложных систем исследована мало, информация о таких системах ситуационна и далека от фундаментальности, поэтому мы вправе последовать примеру Максвелла. Целенаправленность, имманентная или связанная с прагматизмом исследователя (создателя), действует как ограничитель поведения, т.е. как дополнительная закономерность. Физичности представления о системе это не нарушает. Одностороннее, узконаправленное моделирование ни в какой степени не противоречит постулату целостности.

В системе все взаимосвязано, но это не мешает ее рассмотрению с различных точек зрения. Классическая механика, квантовая механика, релятивистская механика позволили познать мир в различных проявлениях, а установление непротиворечивости этих теорий (предположительно – составных частей некоторой более общей теории, которой пока не существует) потребовало больших усилий и было осуществлено только впоследствии. Системотехника – прикладная наука, а в практических задачах упрощение посредством сужения модели – большое преимущество.

#### Литература:

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
2. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. – М., 1980.
3. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. - СПб.: БХВ -Петербург, 2006. - 400 с.
4. Имитационное моделирование производственных систем /Под. ред. А.А.Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983. – 416 с.
5. Эйнштейн А. Физика и реальность. Сборник статей. – М.: Наука, 1965. – 359 с.
6. Оморов Т.Т. Шаршеналиев Ж.Ш., Управление многомерными объектами на основе концепции допустимости. - Бишкек, 1996.
7. <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=62212>