

УДК 08.00.05

**Пичугин Артем Олегович**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет экономики, статистики и информатики»  
Россия, Москва<sup>1</sup>  
Аспирант кафедры ПМ  
ЗАО «КОНКОРД»  
Россия, Москва  
Инженер 2-й категории  
[aorichugin@gmail.com](mailto:aorichugin@gmail.com)

## **Энтропийный подход к анализу социально-экономических систем. Парадокс «контролируемости-эффективности»**

**Аннотация.** Человек окружен в своей деятельности различного рода социально-экономическими системами, которые можно классифицировать по их размеру, по роду деятельности, по типу устройства и т.д. При этом каждая такая система обладает определенной целью своего функционирования, и эта цель находится вне самой системы – во внешней среде.

При этом внешняя среда обладает определенным уровнем разнообразия, предъявляя порой довольно высокие требования к обслуживающей ее системе. Из этого можно сделать вывод, что эффективность системы тем выше, чем лучше она соответствует потребностям внешней среды. Привычным подходом к повышению социально-экономической системы является рост ее контролируемости. Однако в данной работе дается принципиально иной взгляд, который заключается в том, что в иерархических системах контролируемость и эффективность могут вставать в противоречие, образуя управленческий парадокс.

Этот парадокс заключается в том, что невозможно повышать уровень эффективности системы, не уменьшая при этом уровень ее контролируемости. И, наоборот, с ростом контролируемости падает и эффективность взаимодействия иерархической системы с внешней средой. В результате все иерархические системы можно разделить на два класса: 1) те, кто стремится повышать эффективность; 2) и те, кто стремится повышать контролируемость.

**Ключевые слова:** энтропия; разнообразие; система; иерархия; децентрализация; эффективность; контролируемость; управление; оптимизация; полезность; внешняя среда.

---

<sup>1</sup> 119501, г. Москва, ул. Нежинская, 7

Принципиально все системы можно разделить на два больших класса по степени распределения функций среди элементов систем: централизованные системы и децентрализованные системы.

Централизованные системы отличает наличие одного или нескольких элементов, осуществляющих управление всей системой [10]. К таким системам можно отнести систему «звезда» и иерархическую систему.

Систему «звезда» характеризует высокая степень контроля состояния системы центральным узлом. С одной стороны, это является положительной характеристикой, с другой стороны, центральный узел может оказаться перегружен и перестать справляться со своими функциями.

Иерархия же является более «мягким» вариантом. В ней по-прежнему управленческие функции выполняет один элемент, однако он управляет всего лишь несколькими элементами, связанными непосредственно с ним, которые в свою очередь управляют своими подчиненными элементами, и так до последних уровней иерархии. Последний уровень иерархии, как правило, представляет собой непосредственных исполнителей указаний центрального элемента, и именно этот уровень взаимодействует с внешней средой. Этот тип структур имеет гораздо большее распространение среди систем, состоящих из людей.

Децентрализованные системы не имеют явного элемента, который осуществляет управленческие функции всей системы и пытается ее контролировать [13]. В таких системах функции управления распределены в том или ином виде среди всех элементов системы. Каждый элемент такой системы обладает значительной степенью автономии и способен осуществлять свою деятельность с той или иной степенью эффективности самостоятельно. Такие системы также называют горизонтальными системами, так как, например, в отличие от иерархических, они содержат только один уровень иерархии, а значит, и не имеют, так называемой, «властной вертикали».

Децентрализованная система представляет собой неориентированный граф, в отличие от централизованных систем. Однако на практике это не означает, что все элементы системы являются одинаковыми. Отдельные элементы за счет своего положения внутри такой сети могут обладать более сильным влиянием по сравнению с другими элементами.

Главными достоинствами, которые приписываются [4] централизованным системам, являются:

1. высокие мобилизационные способности;
2. быстрое принятие решений;
3. простая координация элементов;
4. возможность прямой оптимизации системы.

Высокие мобилизационные способности означают, что решение, принятое на верхних уровнях иерархии, является обязательным для исполнения всеми соответствующими нижними уровнями иерархии.

При этом сам процесс принятия решений может оказываться более быстрым, так как в нем изначально принимает участие меньшее количество элементов.

Также координация элементов нижних уровней проходит быстрее и проще, так как из центра следуют необходимые инструкции и указания.

Прямая оптимизация системы означает принципиальную возможность сбора и анализа информации о деятельности элементов системы и дальнейшую выработку решений, направленных на улучшение целевых показателей.

К достоинствам децентрализованных систем относят следующие свойства:

1. высокая адаптируемость;
2. высокая структурная устойчивость;
3. большая защищенность от некомпетентности.

Высокая адаптируемость означает, что система способна к более быстрой подстройке своей деятельности к изменившимся параметрам окружающей среды. Это достигается за счет того, что каждый элемент системы обладает автономией и вправе принимать самостоятельные решения относительно своей деятельности.

Высокая структурная устойчивость означает то, что в структуре системы нет такого элемента, удаление которого приводило бы к существенному падению производительности системы, вплоть до ее разрушения.

Большая защищенность от некомпетентности вытекает из предыдущего свойства. Однако затрагивается другая сторона, которая связана с тем, что центральный элемент может обладать высокой некомпетентностью, что будет приводить к неэффективным действиям всей системы. Как видно, достоинства одного типа систем являются недостатками другого типа систем.

Изучением общих закономерностей получения, хранения, передачи и преобразования информации в сложных управляющих системах занимается наука кибернетика. Основателем этой научной теории является Н. Винер [2, 3 и др.]. Большой вклад в ее развитие внесли Джон фон Нейман [6, 7 и др.], У. Мак-Каллок [5], У. Эшби [9].

Последний из них сформулировал так называемый первый фундаментальный закон кибернетики или закон необходимого разнообразия. Закон формулируется следующим образом.

«Пусть заданы  $x$  – элементы множества состояний управляемой системы  $X$  и  $u$  – управления из множества управлений  $U$ . Управление переводит состояние  $x$  в состояние  $y$ , то есть:

$$u: x \rightarrow y \in Y \subseteq X \quad (1)$$

Пусть также заданы вероятности реализации  $x$ ,  $y$  и  $u$  на соответствующих множествах. Тогда система  $X$  будет неуправляемой, если:

$$H(y) \geq H(x), \quad (2)$$

где  $H(\ )$  – энтропия соответствующей случайной величины».

При этом энтропия результатов деятельности  $H(y)$  определяется по формуле:

$$H(y) = H(x) - H(u) + H(u | x) \quad (3)$$

Это означает, что энтропия результатов управления равна энтропии состояний управляемой системы за вычетом энтропии управления, также здесь еще прибавляется энтропия незнания управления о системе.

Это хорошо демонстрируется на примере. Предположим, что система имеет 3 состояния, и управление имеет 3 элемента из своего множества. Казалось бы, этого достаточно, чтобы обеспечить высокую управляемость системой. Однако управление может

использовать свои 3 элемента не попадая, выбирая их наугад, или же плохо идентифицируя состояние системы, выбирая оптимальный вариант управления, но для другого состояния. Это приводит к увеличению энтропии результатов действия управления.

Если подставить выражение (3) в неравенство (2), то получим следующее:

$$H(u | x) \geq H(u) \quad (4)$$

Выражение (4) является новым условием, при котором достигается неуправляемость системы. Оно означает, что энтропия управления должна соответствовать уровню знаний о системе. Если энтропия незнания системы оказывается больше энтропии управления, то такая система будет считаться неуправляемой.

В качестве примера можно представить систему здравоохранения. На вход поступили пациенты с заданной энтропией состояний. Если врачи будут обладать множеством лекарственных препаратов, но не будут знать, в каких случаях их нужно применять, то это будет приводить к еще большей энтропии состояний пациентов ввиду, например, различных побочных действий. При этом если снизить количество лекарственных препаратов до того уровня, когда врачи знают, для чего эти лекарства нужны, и не будут применять их не попадая, то управляемость системы здравоохранения повысится. При этом речь здесь идет не о том, будет ли в целом улучшение состояния больных – в выражении (4) отсутствует информация об энтропии результатов управления, речь идет только об управляемости системой.

Исходя из этого закона, вытекает, что целью управления является снижение энтропии системы. Если представить управление в качестве черного ящика, то энтропия, поданная на вход этого ящика, должна быть больше энтропии, вышедшей из этого ящика.

В таком случае в качестве показателя эффективности управления можно взять отношение энтропии, поданной на вход, и энтропии, поданной на выход:

$$E(u) = 1 - \frac{H(y)}{H(x)}, \quad (5)$$

где  $E(u)$  – эффективность управления.

Идеально функционирующее управление будет обладать показателем  $E(u)$ , равным 1, так как энтропия выхода, возникшая в результате этого управления, достигла своего возможного минимума.

Уточнение закона необходимого разнообразия Эшби для иерархических систем сделал в свое время российский кибернетик Е. Седов [8]. Он отметил, что «действительный рост разнообразия на высшем уровне обеспечивается его эффективным ограничением на предыдущих уровнях». Из этого также вытекает и обратный вывод, что «рост разнообразия на нижнем уровне [иерархии] разрушает верхний уровень организации».

Закон Седова (или закон иерархических компенсаций) и закон Эшби несут в себе довольно интересные выводы о взаимодействии иерархических систем с внешней средой, если рассмотреть их в комплексе.

Предположим, что есть иерархическая система  $S$ , состоящая из нескольких уровней, и существует внешняя среда  $\varepsilon$ , с которой эта система взаимодействует. Взаимодействие осуществляется путем формирования запросов или сигналов к системе, в ответ на которые система должна совершать правильные ответные реакции, соответствующие поданным запросам.

Согласно закону Эшби, взаимодействие системы с внешней средой будет считаться управляемым, если энтропия внешней среды после взаимодействия с системой будет

становиться меньше. В таком случае в качестве показателя эффективности взаимодействия системы с внешней средой можно взять следующее:

$$E_s = 1 - \frac{H(Y)}{H(\varepsilon)}, \quad (6)$$

где  $E_s$  – эффективность взаимодействия системы с внешней средой,  
 $H(Y)$  – разнообразие (энтропия) внешней среды после взаимодействия,  
 $H(\varepsilon)$  – разнообразие (энтропия) внешней среды до взаимодействия.

При этом, исходя из (3),  $H(Y)$  определяется по следующей формуле:

$$H(Y) = H(\varepsilon) - H(S) + H(S | \varepsilon) \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в (6), получим следующее:

$$E_s = \frac{H(S) - H(S | \varepsilon)}{H(\varepsilon)}, \quad (8)$$

Сделаем предположение, что система стремится максимизировать свою эффективность взаимодействия. Это означает, что  $E(S)$  должно равняться единице. Тогда, приравняв выражение (8) к единице, получим следующее:

$$H(S) - H(S | \varepsilon) = H(\varepsilon), \quad (9)$$

Условие (9) является необходимым условием достижения системы максимальной эффективности. Разнообразие системы за вычетом уровня незнания системой внешней среды должно быть равно разнообразию внешней среды. Поскольку  $H(\varepsilon)$  является константой, причем может обладать достаточно большими значениями, то для соблюдения условия (9) система должна повышать свое разнообразие вместе с уменьшением незнания внешней среды.

Поскольку именно нижние уровни иерархии непосредственно взаимодействуют с внешней средой, то получается, что разнообразие системы определяется разнообразием нижних уровней иерархии. Для того чтобы в этом убедиться, достаточно представить крайний случай на примере того, когда на заводе существует только один тип станка, который вытачивает только один вид деталей. Разнообразие завода ограничивается именно нижним уровнем иерархии, поскольку руководство этого завода может приобрести станок другого типа и найти под него нового мастера. В таком случае разнообразие завода повысится за счет разнообразия нижнего уровня иерархии.

Однако повышать уровень разнообразия нижних уровней до бесконечности руководство завода не может, так как в какой-то момент утратит контроль и понимание того, что происходит. И по закону Седова, это будет означать разрушение верхнего уровня иерархии. Верхний уровень иерархии перестает быть востребованным. В результате возникает парадокс между эффективностью и контролируемостью иерархической системы. Для того чтобы повысить эффективность взаимодействия системы с внешней средой, необходимо снизить ее контролируемость. Для того чтобы повысить контролируемость системы, необходимо снизить ее эффективность.

Формально контролируемость системы можно описать при помощи отношения разнообразия верхнего уровня иерархии и нижнего уровня иерархии:

$$C_s = \frac{H(top)}{H(bottom)} = \frac{H(top)}{H(S)}, \quad (10)$$

где  $C_s$  – контролируемость системы,

$H(top)$  – разнообразие (энтропия) верхних уровней иерархии,

$H(bottom)$  – разнообразие (энтропия) нижних уровней иерархии.

Если выразить  $H(S)$  из (8), то получим следующее выражение:

$$H(S) = H(\varepsilon) \cdot E_s + H(S | \varepsilon). \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в (10), получим следующую формулу нахождения контролируемости системы:

$$C_s = \frac{H(top)}{H(\varepsilon) \cdot E_s + H(S | \varepsilon)}. \quad (12)$$

В выражении (12) наглядно видно, что контролируемость системы и ее эффективность находятся в обратной зависимости.

Предположим, что верхний уровень иерархии представляет собой агента, обладающего рациональностью. Это, в частности, означает, что он стремится максимизировать свою целевую функцию в условиях существующих ограничений. Однако в этом случае перед верхним уровнем иерархии стоит многокритериальная задача оптимизации. Ему одновременно требуется, с одной стороны, повышать эффективность, с другой – контролируемость системы.

Для решения этой многокритериальной задачи можно воспользоваться методом изменения ограничений [12]. Метод заключается в том, что одна из целевых функций остается целевой функцией, а остальные превращаются в ограничения. Тогда в таком случае здесь может получиться два вида оптимизационных задач.

В первой оптимизационной задаче целевая функция включает в себя эффективность. Контролируемость системы тогда станет ограничением, в правой части которого будет стоять единица, так как по закону Седова, верхний уровень иерархии не хочет быть уничтожен [8], и его энтропия должна, как минимум, соответствовать энтропии нижнего уровня иерархии (или, что тоже самое – системы). Формально оптимизационная задача для краткосрочного периода будет иметь вид:

$$E_s(H(S)) = \frac{H(S) - H(S | \varepsilon)}{H(\varepsilon)} \rightarrow \max$$
$$C_s = \frac{H(top)}{H(S)} \geq 1 \quad (13)$$

В краткосрочном периоде единственным управляемым параметром является энтропия системы  $H(S)$ . Его снижение достигается за счет стандартизации, унификации и т.д. Повышение же уровня разнообразия верхнего уровня иерархии  $H(top)$  требует создания новых подразделений, повышения качества управления и т.д., что несет в себе существенные финансовые и временные затраты, как в прочем и уменьшение уровня незнания о внешней среде  $H(S|\varepsilon)$ .

Очевидно, что оптимум задачи (13) достигается при минимально допустимом значении контролируемости системы. В таком случае оптимальное решение будет иметь вид:

$$E_s^* = \frac{H(top) - H(S | \varepsilon)}{H(\varepsilon)}. \quad (14)$$

При полном устранении уровня незнания о внешней среде эффективность системы достигнет глобального максимума при равенстве энтропии верхнего уровня иерархии и энтропии внешней среды.

Во второй оптимизационной задаче в качестве целевой функции выступает контролируемость, а эффективность системы является ограничением. Формально оптимизационная задача принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} C_s(H(S)) &= \frac{H(top)}{H(S)} \rightarrow \max \\ E_s &= \frac{H(S) - H(S|\varepsilon)}{H(\varepsilon)} \geq E_{кр}(z) \end{aligned} \quad (15)$$

Очевидно, что оптимум задачи (15) достигается на минимально возможном значении ограничения. В таком случае оптимально решение будет иметь вид:

$$C_s^* = \frac{H(top)}{H(\varepsilon) \cdot E_{кр}(z) + H(S|\varepsilon)}. \quad (16)$$

Контролируемость будет достигать глобального максимума при полном устранении уровня незнания о внешней среде, абсолютной неэффективности системы, максимально возможном уровне энтропии верхних уровней иерархии. При этом, как видно, в качестве правой части ограничения в (15) стоит  $E_{кр}(z)$ . Это критическое значение эффективности, которое зависит от давления ( $z$ ), оказываемого внешней средой в ответ. Это давление может рассчитываться как:

$$z = H(\varepsilon) \cdot (1 - E_s) \cdot r, \quad (17)$$

где  $r$  – это средний ущерб, который причиняет внешняя среда в ответ на неправильные действия системы в отношении поданного запроса или сигнала.

Таким образом, давление внешней среды есть произведение энтропии внешней среды на неэффективность системы и на средний ущерб от неправильной обработки запроса.

Как видно, перед верхним уровнем иерархии встает выбор между тем, какую оптимизационную задачу ему решать. Выбор будет определяться, исходя из его функции полезности, в которую входит и контролируемость системы, и ее эффективность:

$$V_{top} = f(E_s, C_s), \quad (18)$$

где  $V_{top}$  – функция полезности верхнего уровня иерархии.

Если говорить конкретнее, то на самом деле выбор будет строиться, исходя из предельной нормы замещения, рассчитанной по этой функции полезности:

$$MRS = \frac{MU_{E_s}}{MU_{C_s}}, \quad (19)$$

где  $MRS$  – предельная норма замещения эффективности системы и ее контролируемости,

$MU_E$  – предельная полезность верхних уровней иерархии от эффективности системы,

$MU_C$  – предельная полезность верхних уровней иерархии от контролируемости системы.

Если  $MRS$  будет больше 1, то верхние уровни иерархии будут делать выбор в пользу оптимизационной задачи (13). Если же  $MRS$  будет меньше 1, то выбор будет сделан в пользу оптимизационной задачи (15).

Если попытаться найти примеры иерархий, соответствующих обоим типам оптимизационных задач, то можно сказать следующее. Оптимизационная задача, связанная с повышением эффективности, может встречаться среди рыночных компаний. Это объясняется тем, что верхний уровень иерархии напрямую получает выгоды от эффективности системы, повышая свою норму прибыли. И в результате топ-менеджмент компаний способен снижать ее контролируемость. Есть примеры того, как некоторые крупные компании (HP, IBM, eBay, Procter & Gamble) стремились к повышению энтропии системы через выделение некоторых своих подразделений в отдельные компании [11].

Примером организаций со второй оптимизационной задачей могут быть государственные учреждения, обладающие абсолютной монополией на рынке. В большинстве случаев повышение эффективности в таких условиях не входит в приоритеты верхнего уровня иерархии. При этом могут возникать и отдельные случаи рентоориентированного поведения, суть которого заключается в конфликте интересов. Верхнему уровню иерархии может быть выгодно снижать эффективность системы для того, чтобы отдельные люди, представляющие внешнюю среду, платили взятки для достижения желаемого уровня эффективности системы лично по отношению к ним [1]. В результате высший уровень иерархии таким образом может повышать свой доход.

Исходя из вышеперечисленного, становится очевидным, что в большинстве своем иерархические системы первого типа являются более эффективными с точки зрения взаимодействия с внешней средой.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Аузан А. Институциональная экономика [Книга]. - М. : ИНРА-М, 2005. - стр. 261.
2. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине [Книга]. - М. : Наука, 1983. - стр. 344.
3. Винер Н. Человек управляющий [Книга]. - Спб. : Питер, 2001. - стр. 196.
4. Классы системных структур [В Интернете]. - 2 Сентябрь 2001 г.. - 17 Октябрь 2014 г.. - [http://www.integro.ru/system/ots/struct\\_classes.htm](http://www.integro.ru/system/ots/struct_classes.htm).
5. Мак-Каллок У. Надежность биологических систем [Книга]. - М. : Мир, 1964.
6. Нейман Дж. фон, Моренштерн О., Теория игр и экономическое поведение [Книга]. - М. : Наука, 1970.
7. Нейман Дж. фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов [Книга]. - М. : Мир, 1971.
8. Седов Е. Информационно-энтропийные свойства социальных систем [Журнал] // ОНС. - 1993 г.. - 5. - стр. 92.
9. Эшби У. Введение в кибернетику [Книга]. - М. : Иностранная литература, 1959. - стр. 432.
10. Burton R. Obel B., Design Models for Hierarchical Organizations: Computation, Information, and Decentralization [Книга]. - [б.м.] : Springer, 1995.
11. Celles D. Suddenly, Breaking Up Is the Thing to Do [Статья] // The New York Times. - 10 Июль 2014 г.. - стр. B1.
12. Sensor Y. Pareto Optimality in Multiobjective Problems [Журнал] // Appl. Math. Optimiz.. - 1977 г.. - 4. - стр. 41-59.
13. Norman J. Diversity in Decentralized Systems: Enabling Self-Organizing Solutions [Конференция] // University of California Los Angeles conference "Decentralization Two". - [б.м.] : Theoretical Division, 1999.

**Рецензент:** Мастяева Ирина Николаевна, ФГБОУ ВПО «Московский Государственный Университет Экономики, Статистики и Информатики (МЭСИ)», заведующая кафедрой, к.т.н., доцент.

**Artem Pichugin**

Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics (MESI)

Russia, Moscow

E-mail: [aopichugin@gmail.com](mailto:aopichugin@gmail.com)

## **Entropy approach to analysis of socio-economic systems. Control-efficiency paradox**

**Abstract.** People are surrounded by different socio-economic systems in their activities. And these systems can be classified by its size, by occupation, by type of organization etc. Herewith every socio-economic system has the purpose of its functioning, and this purpose is out of the system – it is in external environment.

Wherein the external environment has a certain level of diversity, and it is presenting sometimes quite high requirements to the system. And from this, we can conclude that efficiency of system is higher when it better meets needs of the environment. Typical approach to increasing efficiency of a socio-economic system is growth of controllability. However, in this article there is a fundamentally different view: in hierarchical systems, controllability and efficiency could be in contradiction, forming a management paradox.

This paradox lies in the fact that it is impossible to raise level of the system efficiency without reducing the level of controllability. And vice versa, with raising of controllability there is a reduction of efficiency of the system. And as a result, all hierarchal systems can be divided into two classes: 1) those who seeks raising of efficiency; 2) those who seeks raising of controllability.

**Keywords:** entropy; diversity; system; hierarchy; decentralization; efficiency; controllability; management; optimization; utility; environment.

## REFERENCES

1. Auzan A. Institucional'naya e'konomika [Kniga]. - M.: INRA-M, 2005. - str. 261.
2. Viner N. Kibernetika, ili upravlenie i svyaz' v zhivotnom i mashine [Kniga]. - M.: Nauka, 1983. - str. 344.
3. Viner N. Chelovek upravlyayushhij [Kniga]. - Spb.: Piter, 2001. - str. 196.
4. Klassy sistemnyx struktur [V Internetе]. - 2 Sentyabr' 2001 g. - 17 Oktyabr' 2014 g.. - [http://www.integro.ru/system/ots/struct\\_classes.htm](http://www.integro.ru/system/ots/struct_classes.htm).
5. Mak-Kallok U. Nadezhnost' biologicheskix sistem [Kniga]. - M.: Mir, 1964.
6. Nejman Dzh. fon, Morenshtern O., Teoriya igr i e'konomicheskoe povedenie [Kniga]. - M.: Nauka, 1970.
7. Nejman Dzh. fon. Teoriya samovosproizvodyashhixsya avtomatov [Kniga]. - M.: Mir, 1971.
8. Sedov E. Informacionno-e'ntropijnye svoystva social'nyx sistem [Zhurnal] // ONS. - 1993 g. - 5. - str. 92.
9. E'shbi U. Vvedenie v kibernetiku [Kniga]. - M.: Inostrannaya literatura, 1959. - str. 432.
10. Burton R. Obel B., Design Models for Hierachical Organizations: Computation, Information, and Decentralization [Kniga]. - [b.m.]: Springer, 1995.
11. Celles D. Suddenly, Breaking Up Is the Thing to Do [Stat'ya] // The New York Times. - 10 Iyul' 2014 g. - str. B1.
12. Censor Y. Pareto Optimality in Multiobjective Problems [Zhurnal] // Appl. Math. Optimiz. - 1977 g. - 4. - Str. 41-59.
13. Norman J. Diversity in Decentralized Systems: Enabling Self-Organizing Solutions [Konferenciya] // University of California Los Angeles conference "Decentralization Two". - [b.m.]: Theoretical Division, 1999.