

Количественные меры уровня системности и степени детерминированности в рамках СТИ

Аннотация:

В статье впервые предлагаются теоретически обоснованные количественные меры, следующие из системной теории информации (СТИ), которые позволяют количественно оценивать влияние факторов на системы различной природы не по силе и направлению изменения состояния системы, а по степени возрастания или уменьшения ее эмерджентности (уровня системности) и степени детерминированности.

Ключевые слова:

Уровень системности, детерминированность, системная теория информации, системно-когнитивный анализ, системное обобщение.

В процессе формирования и развития систем под влиянием информационных по своему существу факторов они претерпевают количественные и качественные изменения, т.е. проходят точки бифуркации и детерминистские участки траектории [5], в частности изменяются такие фундаментальные характеристики систем, как *уровень системности* и степень детерминированности.

Проблема состоит в том, что, с одной стороны, в настоящее время в науке нет общепринятых теоретически обоснованных количественных мер измерения этих фундаментальных характеристик систем, а с другой стороны, разработка таких мер является весьма востребованной в связи с новейшими перспективами развития автоматизированных систем управления (АСУ). Если еще 10-20 лет назад АСУ рассматривались прежде всего как системы стабилизирующие состояние объекта управления или переводящие его в заранее заданные состояния, то сегодня в качестве одного из перспективных направлений развития АСУ авторы рассматривают системы управления развитием объекта управления, в процессе которого он проходит ряд качественно различных состояний.

Необходимо отметить, что еще в 80-х годах видным исследователем в области информационной теории систем А.А. Денисовым были предложены оригинальные подходы к решению этой проблемы [9, 10]. Однако этим видным ученым развитие объекта во-первых, не рассматривается как чередование качественно-различных состояний, разделенных точками бифуркаций и детерминистскими участками эволюционного развития. Во-вторых, он не рассматривает объект как объект управления в АСУ. Очень перспективный по мнению авторов подход развиваются в фундаментальных работах [11, 12] (см., например, раздел: «2.6. Эволюционная динамика и эмерджентность» в работе [12]), однако в этих работах практически отсутствуют количественные оценки и математический аппарат, из которого бы они следовали.

Учитывая информационный характер антиэнтропийного системообразующего фактора авторы предлагают применить теорию информации для количественной оценки этих фундаментальных характеристик систем.

Однако классическая теория информации не совсем подходит для этой цели, т.к. она основана на теории мно-

жеств, а не на теории систем. В статье [8] предлагается *программная идея* системного обобщения понятий математики, в частности понятий теории информации, основанных на теории множеств, путем замены понятия множества на более содержательное понятие системы. Частично эта идея была реализована в работе [5] при разработке автоматизированного системно-когнитивного анализа (АСК-анализа), математическая модель которого основана на системном обобщении формул для количества информации Хартли и Харкевича в рамках предложенной системной теории информации (СТИ).

Система представляет собой *множество элементов*, объединенных в целое за счет *взаимодействия* элементов друг с другом, т.е. за счет *отношений* между ними, и обеспечивает преимущества в достижении *целей*. Преимущества в достижении целей обеспечиваются за счет *системного эффекта*. Системный эффект состоит в том, что свойства системы *не сводятся* к сумме свойств ее элементов, т.е. система как целое обладает рядом *новых, т.е. эмерджентных* свойств, которых не было у ее элементов. Предполагается, что во Вселенной не существует элементов не являющихся системами. Таким образом все свойства любых систем в конечном счете являются эмерджентными. Уровень системности тем выше, чем выше *интенсивность взаимодействия* элементов системы друг с другом, чем сильнее отличаются свойства системы от свойств входящих в нее элементов, т.е. **чем выше системный эффект, тем больше отличается система от множества.**

Таким образом, *система обеспечивает тем большие преимущества в достижении целей, чем выше ее уровень системности.* В частности, *система с нулевым уровнем системности вообще ничем не отличается от множества образующих ее элементов, т.е. тождественна этому множеству и никаких преимуществ в достижении целей не обеспечивает. Этим самым достигается выполнение принципа соответствия между понятиями системы и множества.* Из соблюдения этого принципа для понятий множества и системы следует и его соблюдение для понятий системной теории информации, основанных на теории множеств и их системных обобщений.

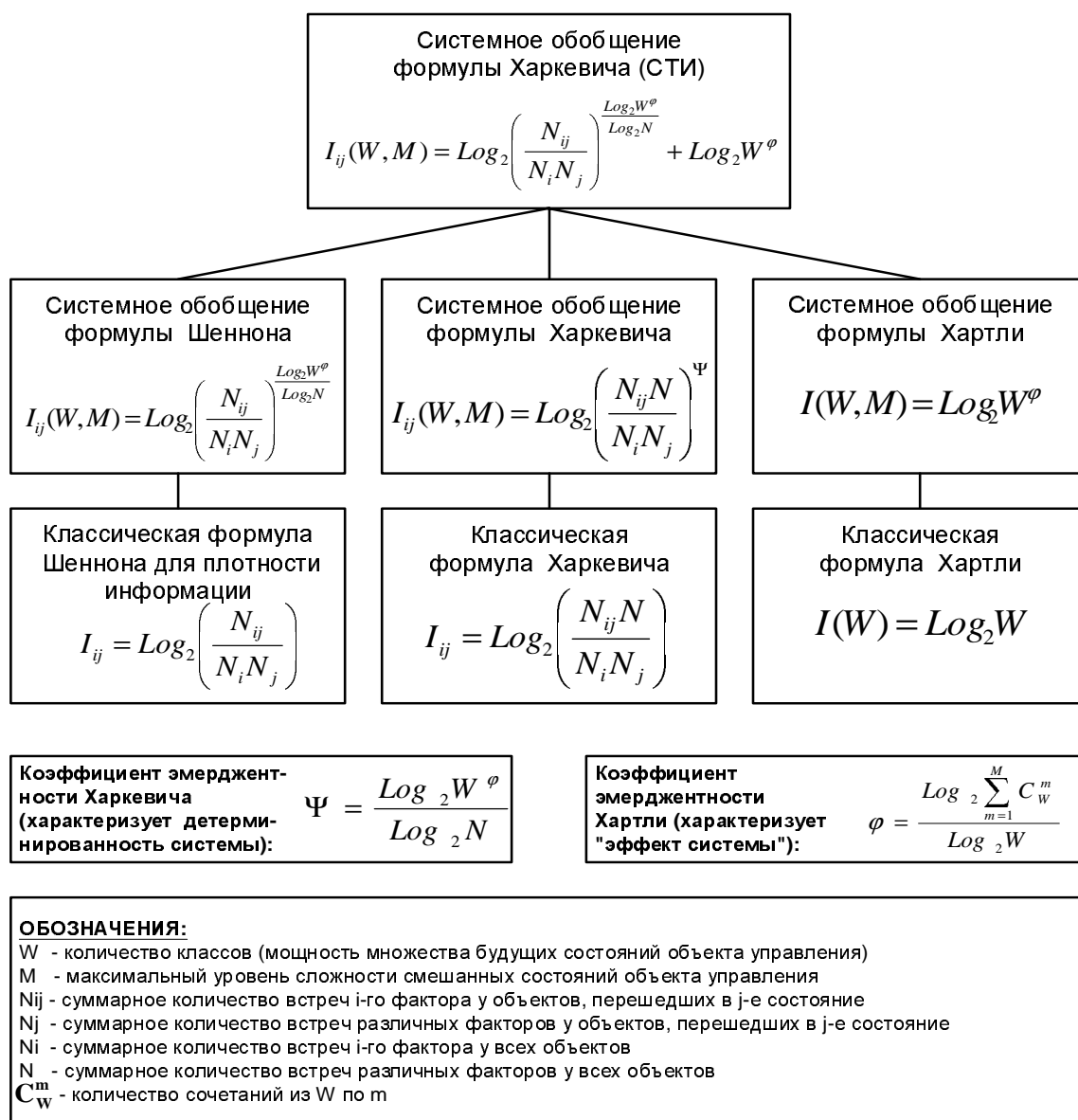
На этой основе можно ввести и новое научное понятие: понятие «антисистемы», применение которого оправдано в случаях, когда централизация (монополизация, интеграция) не только не дает положительного эффекта, но даже сказывается отрицательно.

Антиподсистемой будем называть подсистему, включение которой в некоторую систему уменьшает ее уровень системности, т.е. это такое объединение некоторого множества элементов за счет их взаимодействия в целом, которое *препятствует* достижению целей системы в целом.

Фундаментом современной математики является теория множеств. Эта теория лежит в основе самого глубокого на сегодняшний день обоснования таких базовых математических понятий, как «число» и «функция». Определенный период этот фундамент казался незыблемым. Однако вскоре работы целой плеяды выдающихся ученых XX века, прежде всего Давида Гильберта, Бер-

трана Рассела и Курта Гёделя, со всей очевидностью обнажили фундаментальные логические и лингвистические проблемы, в частности проявляющиеся в форме парадоксов теории множеств, что, в свою очередь, привело к появлению ряда развернутых предложений по пересмотру самых глубоких оснований математики [2].

В задачи данной статьи не входит рассмотрение этой интереснейшей проблематики, а также истории возникновения и развития понятий числа и функции. Отметим лишь, что кроме рассмотренных в литературе вариантов *существует возможность обобщения всех понятий математики, базирующихся на теории множеств, в частности теории информации, путем тотальной замены понятия множества на более общее понятие системы и тщательного отслеживания всех последствий этой замены*. Это утверждение будем называть «программной идеей системного обобщения понятий математики».



Строго говоря, реализация данной программной идеи потребует прежде всего системного обобщения самой теории множеств и преобразования ее в *математи-*

ческую теорию систем, которая будет плавно переходить в современную теорию множеств при уровне системности, стремящемся к нулю. При этом необходимо

заметить, что существующая в настоящее время наука под названием «Теория систем» ни в коей мере не является обобщением математической теории множеств, и ее не следует путать с математической теорией систем. Вместе с тем, на наш взгляд, существуют некоторые возможности обобщения ряда понятий математики и без разработки математической теории систем. К таким понятиям относятся прежде всего понятия «информация» и «функция».

Системному обобщению понятия информации посвящены работы автора [1-8] и др., поэтому в данной статье на этом вопросе мы останавливаться не будем. Отметим лишь, что на основе предложенной системной теории информации (СТИ) были разработаны математическая модель и методика численных расчетов (структуры данных и алгоритмы), а также специальный программный инструментарий (система «Эйдос») системно-когнитивного анализа (СК-анализ), который представляет собой системный анализ, автоматизированный путем его рассмотрения как метода познания и структурирования по базовым когнитивным операциям.

В СК-анализе теоретически обоснована и реализована на практике в форме конкретной информационной технологии процедура установления новой универсальной, сопоставимой в пространстве и времени, ранее не используемой *количественной*, т.е. выражаемой числами, меры *соответствия* между событиями или явлениями любого рода, получившей название «системная мера целесообразности информации», которая по существу является *количественной мерой знаний* [10]. Это является достаточным основанием для того, чтобы называть эту форму системного анализа системно-когнитивным анализом, от английского слова «*cognition*» – «познание».

В результате получены следующие выражения для системных обобщений формул для количества информации Хартли и Харкевича и плотности информации Шеннона, а также гипотезы о законе возрастания эмерджентности и аналитические выражения для коэффициентов Хартли и Харкевича, которые являются научно обоснованными в рамках системной теории информации (СТИ) количественными мерами уровня системности и степени детерминированности систем (рис. 1-2).

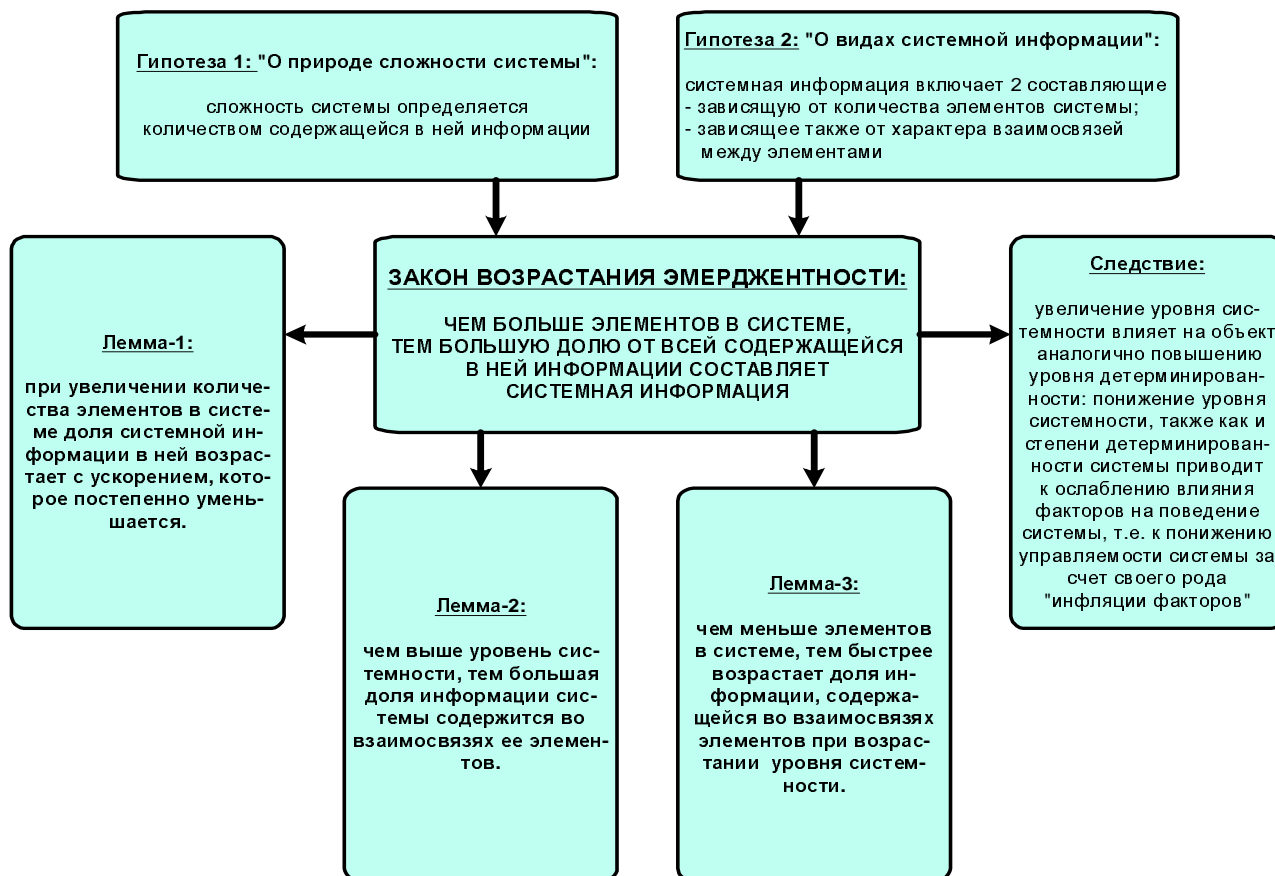


Рисунок 1. Гипотеза о законе возрастания эмерджентности

Резюмируя рисунки 1 и 2, можно сказать, что в процессе эволюции систем есть по крайней мере два этапа:

– на 1-м этапе идет *экстенсивный* рост системы путем увеличения количества ее элементов; при этом объем информации в системе возрастает в основном за счет увеличения размера системы и количества элементов в ней;

– на 2-м этапе идет система развивается *интенсивно* за счет усложнения взаимосвязей между элементами и своей структуры; при этом объем информации в системе возрастает в основном за счет ее усложнения, т.е. повышения уровня системности или эмерджентности системы.

Так, например, управлять толпой из 729 человек значительно сложнее, чем воздушно-десантным полком той же численности. Процесс превращения 729 ново-

бранцев в воздушно-десантный полк это и есть процесс повышения уровня системности и степени детерминированности системы. Этот процесс включает процесс последовательного иерархического структурирования (на отделения, взвода, роты, батальоны), а также процесс повышения степени детерминированности команд путем повышения дисциплины их исполнения путем соответствующих организующих воздействий. *Эффективность этих организующих воздействий мы и предлагаем оценивать по изменению уровня системности и степени детерминированности с помощью коэффициентов эмерджентности, названных нами [5] в честь выдающихся ученых, внесших огромный вклад в создание теории информации Хартли и Харкевича.*

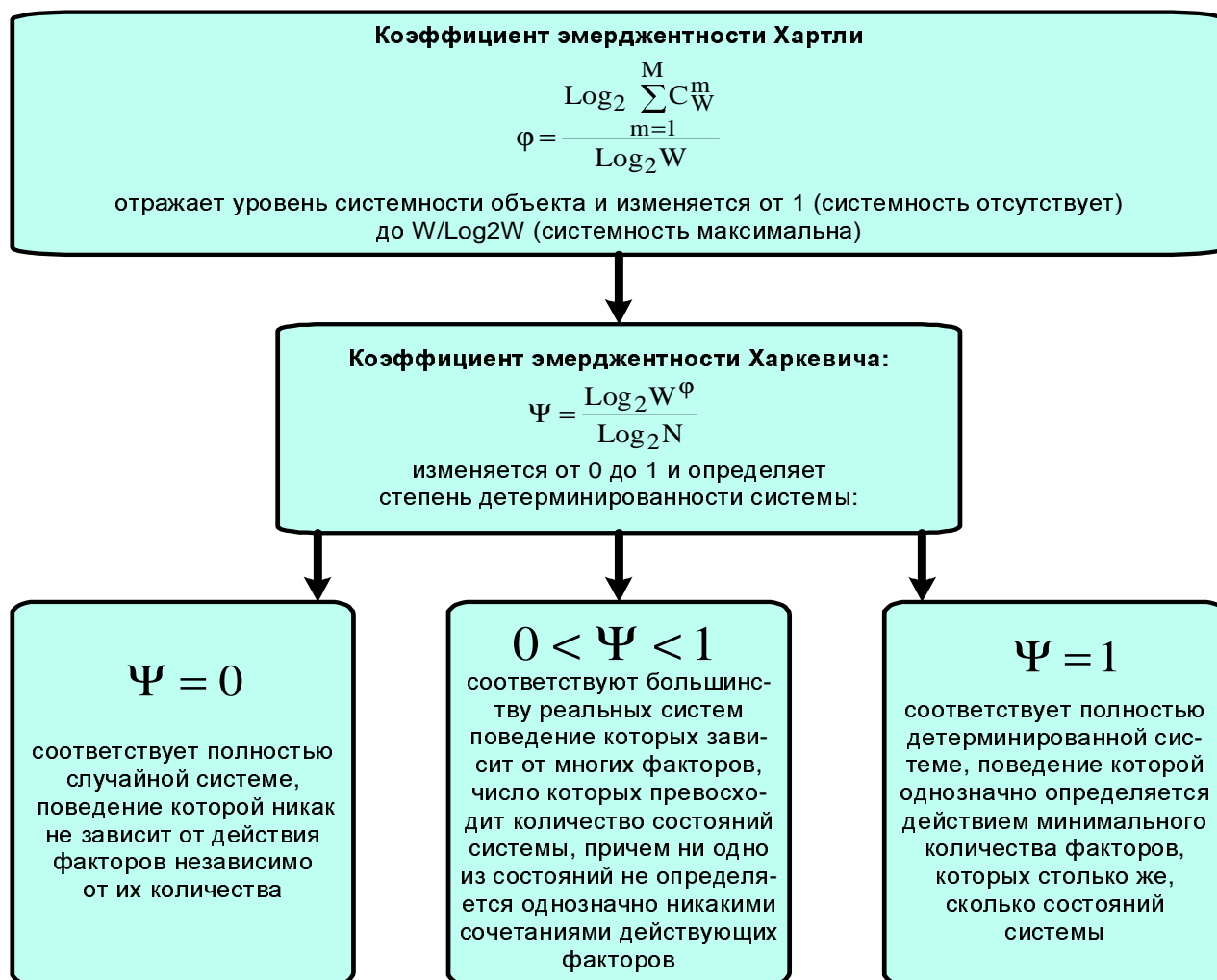


Рисунок 2. Интерпретация коэффициентов эмерджентности СИ

Рассмотрим численный пример.

В работе [5] в разделе: «1.2.2.3. Конструирование системной численной меры на основе базовой», подразделе: «Системное обобщение формулы Хартли для количества информации», который размещен по адресу: http://lc.kubagro.ru/aidos/aidos06_lec/lec_04.htm получено выражение для коэффициента эмерджентности Хартли (1):

$$\varphi = \frac{\log_2 \sum_{m=1}^M C_W^m}{\log_2 W} \quad (1)$$

где:

W – количество элементов в системе альтернативных будущих состояний АОУ (количество чистых состояний);

m – сложность подсистемы (количество элементов 1-го уровня иерархии в подсистеме);

M – максимальная сложность подсистем (количество элементов 1-го уровня иерархии в системе).

Непосредственно из вида выражения для коэффициента эмерджентности Хартли (1) ясно, что он представляет собой относительное превышение количества информации о системе при учете системных эффектов (смешанных состояний, иерархической структуры ее подсистем и т.п.) над количеством информации без учета системности, т.е. этот коэффициент отражает уровень системности объекта.

Необходимо отметить, что сходное выражение было предложено видным исследователем в области информационной теории систем А.А.Денисовым еще в 80-х годах [9, 10], однако свое теоретическое обоснование это выражение получило лишь в рамках СТИ. Очень близкие идеи развиваются также в фундаментальных работах [11, 12] (см., например, раздел: «2.6. Эволюционная динамика и эмерджентность» в работе [12]).

Первое слагаемое в выражении (1) дает количество информации по классической формуле Хартли, а остальные слагаемые – дополнительное количество информации, получаемое за счет системного эффекта, т.е. за счет наличия у системы иерархической структуры или смешанных состояний. По сути дела эта дополнительная информация является информацией об иерархической структуре системы, как состоящей из ряда подсистем различных уровней сложности.

Однако реально в любой системе осуществляются не все формально возможные сочетания элементов 1-го уровня иерархии, т.к. существуют различные правила запрета, различные для разных систем. Это означает, что возможно множество различных систем, состоящих из одинакового количества тождественных элементов, и отличающихся своей структурой, т.е. строением подсистем различных иерархических уровней. Эти различия систем как раз и возникают благодаря различию действующих для них этих правил запрета. По этой причине систему правил запрета предлагается назвать **информационным проектом системы**. Различные системы, состоя-

щие из равного количества одинаковых элементов (например, дома, состоящие из 20000 кирпичей), отличаются друг от друга именно по причине различия своих информационных проектов.

Из статистики известно, что при $M=W$:

$$\sum_{m=1}^M C_W^m = 2^W - 1 \quad (2)$$

в этом случае для выражения (1) получаем:

$$I = \text{Log}_2(2^W - 1) \quad (3)$$

Выражение (3) дает оценку максимального количества информации, которое может содержаться в элементе системы с учетом его вхождения в различные подсистемы ее структуры. Из этого выражения видно, что I быстро стремится к W при увеличении W :

$$\begin{aligned} W &\rightarrow \infty \\ I &\rightarrow W \end{aligned} \quad (4)$$

В действительности уже при $W > 4$ погрешность выражения (4) не превышает 1%, поэтому на практике в большинстве случаев при оценке величины теоретически максимально-возможного значения уровня системности не будет большой ошибкой вместо суммы числа сочетаний использовать просто W .

Таким образом, коэффициент эмерджентности Хартли отражает уровень системности объекта и изменяется от 1 (системность минимальна, т.е. отсутствует) до величины $\frac{W}{\text{Log}_2 W}$ (системность максимальна). Очевидно, для каждого количества элементов системы существует свой максимальный уровень системности, который никогда реально не достигается из-за действия правил запрета на реализацию в системе ряда подсистем различных уровней иерархии.

Будем считать, что полк является системой, имеющей иерархическую структуру (такие системы являются наиболее распространенными).

Если в толпе из 729 (или любого другого количества W) новобранцев (элементов 1-го уровня иерархии) нет ни одного командира, то ее уровень системности согласно выражения (1) равен 1:

$$\varphi = \frac{\text{Log}_2 \sum_{m=1}^M C_W^m}{\text{Log}_2 W} = \frac{\text{Log}_2 \sum_{m=1}^1 C_W^m}{\text{Log}_2 W} = \frac{\text{Log}_2 C_W^1}{\text{Log}_2 W} = \frac{\text{Log}_2 W}{\text{Log}_2 W} = 1 \quad (5)$$

Если в полку появляется командир полка, непосредственно (напрямую) дающий указания каждому из солдат (что вообще-то достаточно проблематично реализовать на

практике), то появляется еще 729 дополнительных элементов 2-го уровня иерархии вида: «Командир полка + N -й солдат». В этом случае выражение (1) примет вид (6):

$$\varphi = \frac{\text{Log}_2 \sum_{m=1}^M C_W^m}{\text{Log}_2 W} = \frac{\text{Log}_2(729 + 729)}{\text{Log}_2 729} = 1,10515 \quad (6)$$

Но в реальном полку используется не двухуровневая, а многоуровневая иерархическая система управления, т.к. командир полка и любой другой командир из-за информационных, пространственных и временных ограничений реально может отдать конкретный детализиро-

ванный приказ только очень ограниченному количеству нижестоящих командиров – системообразующих элементов следующего уровня иерархии. Рассмотрим структуру условного полка, приведенную на рисунке 3.

Проведем расчет уровня системности полка, иерархическая структура которого приведена на рисунке 3 с использованием формулы (1). При этом обращаем внимание на то обстоятельство, что приведенная иерархиче-

ская структура близка к фрактальной. По-видимому это не случайно, т.к. является одной из наиболее рациональных схем управления.

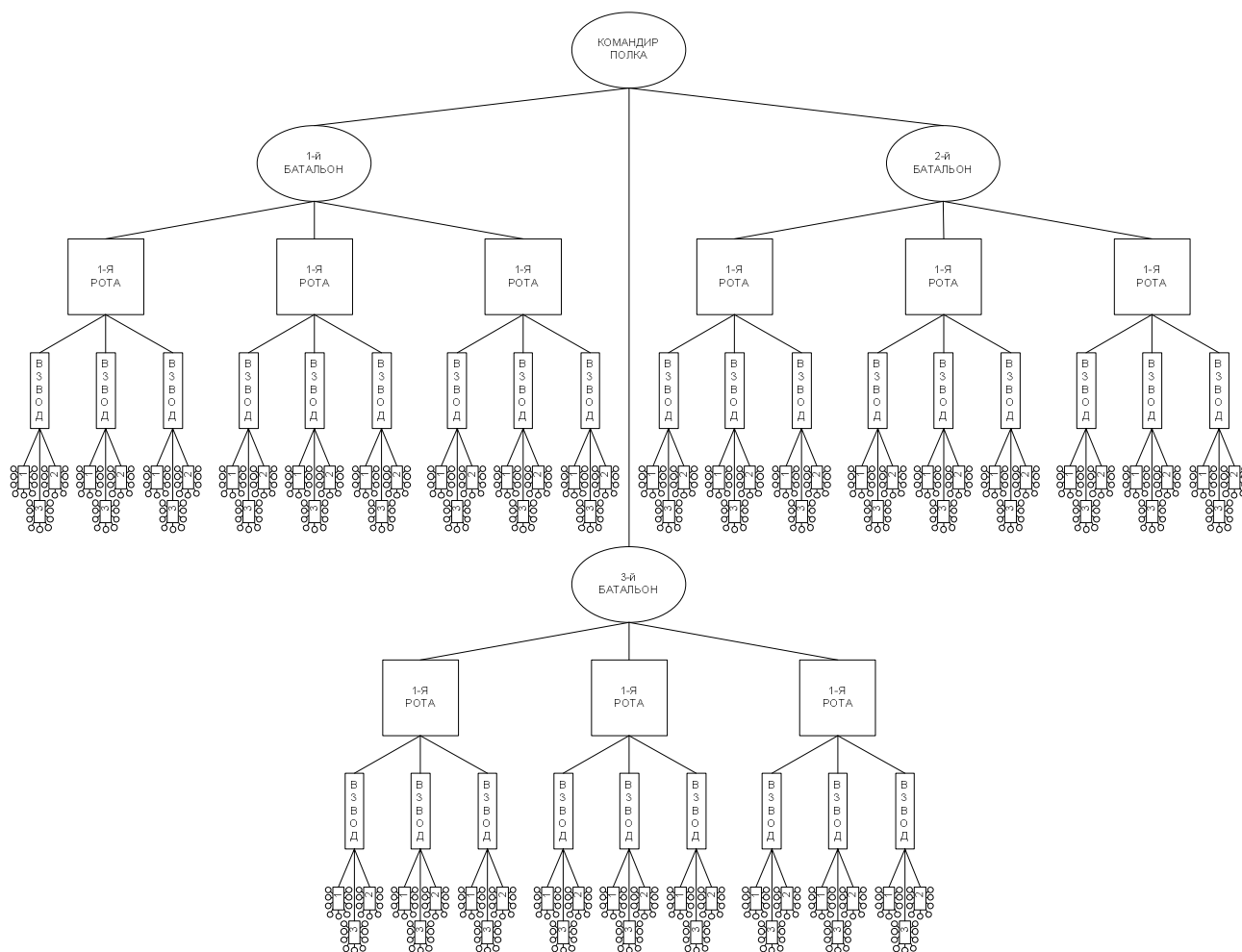


Рисунок 3. Иерархическая система управления полком (условно)

1-й уровень иерархии: 729 солдат. Уровень системности полка на 1-м уровне иерархии, как мы уже видели из формулы (5) равна 1.

2-й уровень иерархии: 81 отделение по 9 солдат в каждом. Добавление командиров отделений порождает в

каждом из 81 отделений 9 элементов вида: «Командир i -го отделения + j -й солдат». Уровень системности полка на первых двух уровнях вычисляется по формуле (7):

$$\varphi = \frac{\log_2 \sum_{m=1}^M C_W^m}{\log_2 W} = \frac{\log_2 (729 + 81 \times 9)}{\log_2 729} = 1,10515 \quad (7)$$

Здесь необходимо отметить, что структурный элемент «отделение», как и подсистемы других уровней иерархии, рассматривается не как неделимые элементы, а именно как подсистемы, сами имеющие определенный уровень системности, определяемый их структурой. Возможны и другие подходы, рассматривающие подсистемы как элементы без учета их внутренней структуры, т.е. не учитывающие различное в общем случае содержание подсистем, но в данной работе они не рассматриваются.

Вместе с тем приведенные выше аналитические выражения для коэффициентов эмерджентности имеют общий характер и применимы и в этом случае.

3-й уровень иерархии: 27 взводов по 3 отделения в каждом. Добавление командиров взводов порождает в каждом из 27 взводов по 3 элемента вида: «Командир i -го взвода + командир j -го отделения». Уровень системности полка на первых трех уровнях вычисляется по формуле (8):

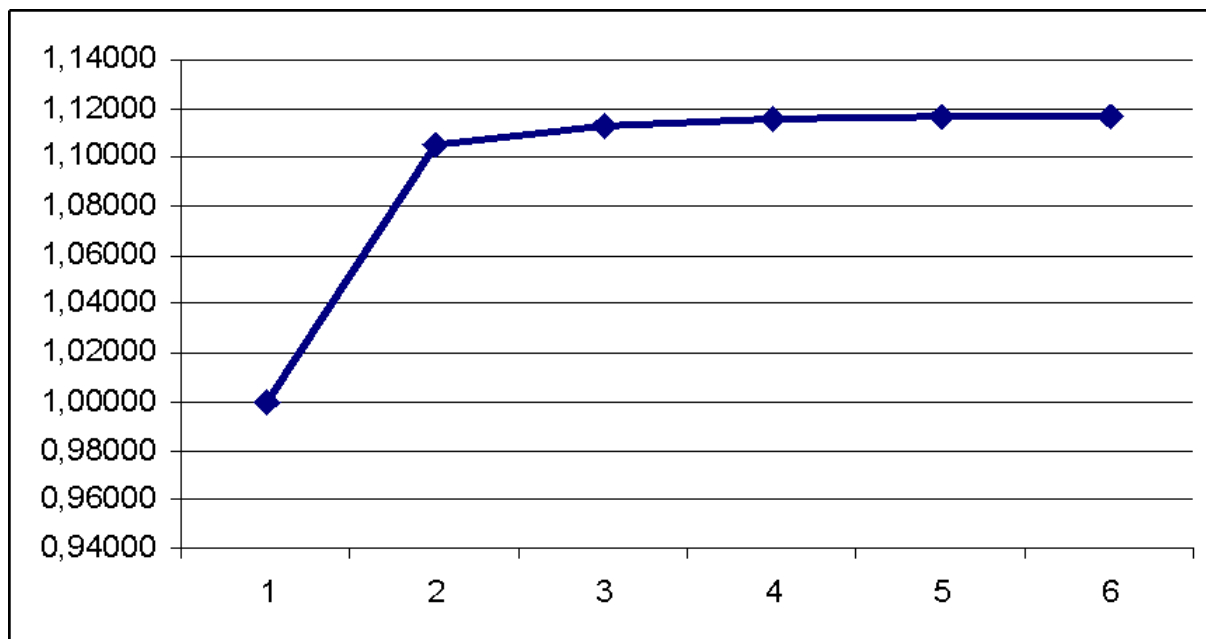


Рисунок 4. Зависимость эмерджентности системы от появления в ней новых все более высоких иерархических уровней управления

Если проанализировать приведенную таблицу, рисунок 2, на котором показана динамика эмерджентности и выражения (6)-(11), то сразу бросается в глаза, что создание иерархической системы управления полком приводит к добавлению в систему значительно большего количества элементов, чем при реализации двухуровневого управления командиром полка напрямую каждым солдатом, если бы такое было возможно на практике. Соответственно это приводит к гораздо более значительному повышению уровня системности полка и более выраженному системному эффекту (эмерджентности), выражающемуся в том, что полк с иерархической структурой управления значительно более боеспособен и живуч, чем с одноуровневой. Видно, что добавление в систему новых все более высоких иерархических уровней управления приводит ко все меньшему увеличению системного эффекта (эмерджентности), т.е. в основном в этом смысле играет роль появление 1-го уровня иерархии (отделений, в нашем примере).

Кроме того из рассмотренных примеров можно сделать вывод о зависимости степени живучести системы в целом от степени ее иерархичности при нарушении системы управления: *чем выше степень иерархичности системы управления, тем в меньшей степени ее нарушение изменяет уровень системности и тем более живуча система в целом в случае нарушения ее системы управления.* Это можно объяснить наличием системообразующих факторов на различных уровнях организации системы (в нашем примере это командиры батальонов, рот, взводов и отделений). В частности при невозможности для командира полка выполнять свои функции по состоянию здоровья:

– в гипотетическом случае, когда он управлял каждым солдатом непосредственно полк бы сразу превратился из единого слаженного организма в дезорганизованную толпу, в которой каждый сражается сам за себя;

– в случае приведенной 6-уровневой иерархической системы управления полк исчез бы как единое целое, но продолжал бы достаточно эффективно сражаться в составе организованных отдельных батальонов, сохраняющих полную управляемость и боеспособность.

Но теоретически максимальный уровень системности нашего условного полка с 729 солдатами составляет: $729/\log_2 729 = 76,65797$. Можно предположить, что этот огромный уровень системности мог бы быть обеспечен, если бы весь полк состоял сплошь из одних джедаев, свободно непрерывно телепатически общающихся друг с другом и действующих как единое целое, т.е. практически как одно практически непобедимое существо (если даже с одним таким воином очень проблематично справиться, то можно себе представить какую силу представляет высокоорганизованная группа из 729 воинов без слов мгновенно и полностью понимающих друг друга независимо от того, где и в какой ситуации каждый из них находится).

Здесь необходимо отметить также известное положение из теории информации Шеннона состоящее в том, что *энтропия системы тем меньше, чем больше взаимная информация в ее подсистемах друг о друге.* В биологических системах до определенного иерархического уровня их организации (клетки) в каждой подсистеме вообще имеется полная информация о всей системе в целом (геном). Это обеспечивает слаженную работу различных подсистем организма и сводит к минимуму потребность в обмене информацией между ними.

Однако добавление новой подсистемы в состав организационной системы не всегда приводит к повышению ее уровня системности, как казалось бы можно было ожидать. Если продолжить пример с полком, то это соответствует случаю внедрения в полк вражеского разведчика или просто лишнего управленческого звена, которое не вносит в систему управления ничего нового и ценного, а лишь дублирует команды, и хорошо еще если делает это

своевременно и без их искажения, а иногда и просто блокирует прохождение команд на исполнение. Именно о подобных случаях говорят: «Начальник уехал в служебную командировку и работа подразделения неожиданно стабилизировалась, наладилась, сотрудников перестало лихорадить». В организациях уровень системности может понижаться при неоправданном разбухании административного аппарата.

В технической системе при ее повреждении также уменьшается количество исправных функциональных элементов, а также узлов и подсистем, в результате чего уменьшается уровень системности и степень детерминированности, т.е. управляемости системы.

В этой связи предлагается специально различать управляющие воздействия, целью которых является перевод объекта управления в заранее заданное целевое состояние без изменения его уровня системности и степени детерминированности, т.е. *использование* объекта управления, и *управляющие воздействия направленные на повышение самого уровня системности и степени детерминированности объекта управления, т.е. организующие управляющие воздействия, направленные на создание и развитие объекта управления.*

Если в первом случае управляющие факторы можно оценивать по силе и направлению их влияния на объект управления, то во втором случае – по величине и направлению изменения уровня системности и степени детерминированности, которые можно количественно измерять с помощью предложенных выражений системной теории информации для коэффициентов эмерджентности Хартли и Харкевича, названных так в работе [5] в честь этих выдающихся ученых.

В работе [5] приводится развернутый пример применения АСК-анализа в качестве методологии создания двухуровневой адаптивной АСУ учебным процессом, в которой в качестве объекта управления на первом уровне выступает сам учебный процесс, а на втором – учащийся как активная рефлексивная система, уровень системности которой, т.е. иначе говоря уровень развития, повышается в результате управляющего воздействия.

Примечания:

1. Луценко Е.В. Универсальная автоматизированная система распознавания образов «Эйдос» (версия 4.1). Монография (научное издание). – Краснодар: КЮИ МВД РФ, 1995. – 76с.
2. Луценко Е.В. Теоретические основы и технология адаптивного семантического анализа в поддержке принятия решений (на примере универсальной автоматизированной системы распознавания образов «ЭЙДОС-5.1»). Монография (научное издание). – Краснодар: КЮИ МВД РФ, 1996. – 280с.
3. Симанков В.С., Луценко Е.В. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов. Монография (научное издание). – Краснодар: ТУ КубГТУ, 1999. – 318с.
4. Симанков В.С., Луценко Е.В., Лаптев В.Н. Системный анализ в адаптивном управлении: Монография (научное издание) / Под науч. ред. В.С.Симанкова. – Краснодар: ИСТЭК КубГТУ, 2001. – 258с.
5. Луценко Е. В. Автоматизированный системно-когнитивный анализ в управлении активными объектами (системная теория информации и ее применение в исследовании экономических, социально-психологических, технологических и организационно-технических систем): Монография (научное издание). – Краснодар: КубГАУ. 2002. – 605 с.
6. Луценко Е.В. Интеллектуальные информационные системы: Учебное пособие для студентов специальности: 351400 «Прикладная информатика (по отраслям)». – Краснодар: КубГАУ. 2004. – 633 с.
7. Луценко Е.В., Лойко В.И., Семантические информационные модели управления агропромышленным комплексом. Монография (научное издание). – Краснодар: КубГАУ, 2005. – 480с.
8. Денисов А.А. Информационные основы управления. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 72 с.
9. Денисов А.А., Колесников Д.Н. Теория больших систем управления. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 287 с.
10. Крайноченко И. В., Попов В. П. Системное мировоззрение. Теория и анализ. Учебник для вузов. – Пятигорск.: ИНЭУ, 2005. – 218 с.
11. Попов В.П. Глобальный эволюционизм и синергетика ноосферы / В.П. Попов и И.В. Крайноченко. – науч. изд. – Ростов-на-Дону: ГНУ СКНЦ ВШ, 2003. – 333 с.
12. Там же.