

# ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЦЕПЕЙ И ОЦЕНКА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА В УПРАВЛЕНИИ

О.О. Павловская

В последние годы в научной литературе все большее внимание уделяется роли человеческого фактора в процессах управления. В работах Ю.М. Горского эта проблема решается системно и на математическом уровне. Поэтому методическая разработка его результатов представляет практический интерес при создании сложных технических, технологических, производственных систем, функционирующих с участием человека.

## 1. Простейшая информационная цепь

Любые системы управления, из каких бы элементов они ни сложились и какие бы цели ни преследовали, по существу являются системами передачи и переработки информации, то есть информационными системами.

Информационная цепь - совокупность взаимодействующих источников, преобразователей и потребителей информации.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют информационные цепи социальных систем управления. Примером информационной цепи социальной системы управления может служить структура государственного управления, где законодательные органы выступают в качестве источников управляющей информации для исполнительной власти, выполняющей в этом случае роль информационной нагрузки, а отчеты местных органов, газетные репортажи, статьи и реакция избирателей обеспечивают обратный поток информации к законодательным органам.

В общем случае информационные цепи (в том числе и информационные цепи социальных систем управления) представляют собой довольно сложные сильно разветвленные многоконтурные иерархические структуры, а в простейшем случае элементарная информационная цепь состоит из одного источника информации, одного потребителя информации (информационной нагрузки) и связывающих их проводников информации (информационных каналов) (рис. 1).

Такие информационные цепи всегда замкнуты на источник либо посредством каналов прямой и обратной связи, либо (в отсутствие одного из них) посредством логических связей между источником и нагрузкой. Так, в отсутствие обратной связи в некоторых системах программного управления ее роль выполняет уверенность в предопределенности поведения объекта под воздействием программы. Напротив, в чисто познавательных (измерительных) системах, где отсутствует канал воздействия на объект познания (прямая связь), его функции компенсируются установлени-

ем логических связей между познающим объектом и объектом познания по мере изучения последнего. Наконец, в отсутствие, казалось бы заметной связи между источником и приемником, связь между ними обеспечивает интуиция.

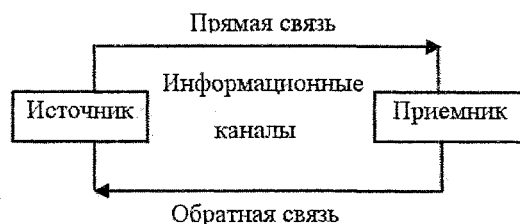


Рис. 1. Структура информационной цепи

Из теории информационных цепей известно [1], что состояние окружающей нас материи характеризуется некоторой неопределенностью, или энтропией,  $H_0 = -\log P_0$ , которая выступает в роли информационного потенциала (сути) события, априорная вероятность которого равна  $P_0$ . Целью и смыслом всякого управления является изменение в ту или иную сторону этой априорной вероятности события до некоторого нового значения  $P_{\text{всл}}$ , которому соответствует новое значение потенциала  $H_{\text{всл}} = -\log P_{\text{всл}}$  где  $P_{\text{всл}}$  - вероятность события при условии управления им.

Таким образом, сущность управления, осуществляемого источником информации, может быть охарактеризована некоторым информационным напряжением

$$\Delta H = H_0 - H_{\text{всл}} = \log(P_0/P_{\text{всл}}). \quad (1)$$

В управленческой деятельности источником информации являются обычно люди, коллективы людей либо технические устройства. Так, оператор, управляющий прокатным станом, является источником управляющей информации, напряжение которого равно логарифму отношения вероятности успешной работы оператора к вероятности успешной работы стана при устранении оператора. Точно так же министерство является источником управляющей информации для отрасли, имея информационное напряжение, определяемое вероятностями выполнения отраслью государственного плана при наличии и устранении всего управленческого аппарата министерства. Наконец, система программного управления станком является источником информации, напряжение которого определяется вероятностями успешного выполнения станком нужной операции при наличии и отсутствии соответствующей программы.

Из (1) следует, что информационное напряжение источника  $\Delta H$  может быть как положитель-

ным, когда его целью является увеличение вероятности события, так и отрицательным, когда его целью является снижение вероятности события. Если же  $P_{\text{всл}} = P_0$ , то напряжение источника равно нулю, т.е. его роль в управлении несущественна, и он не имеет смысла.

Информационное, напряжение, как и энтропию, можно измерять в различных единицах в зависимости от выбора основания логарифма в (1). Часто в (1) используют двоичные логарифмы, поскольку это обеспечивает хорошо интерпретируемую размерность всех других информационных величин, поэтому единицы напряжения - биты.

В качестве примера подсчитаем информационное напряжение, которым обладает система оповещения противовоздушной обороны в такой ситуации, когда к очень важному объекту, непосредственно обороняемому зенитно-ракетной установкой, сквозь внешнее оборонительное кольцо прорвались два однотипных самолета противника, один из которых потратил свой наиболее разрушительный боезапас в процессе прорыва. В этом случае, не имея уже времени поразить оба самолета, зенитно-ракетная установка, не связанная с системой оповещения, поразит самолет с нерастроченным боезапасом с вероятностью 0,5. Если же система оповещения успеет правильно ориентировать установку, то та поразит самолет, обладающий разрушительной мощностью, скажем, с вероятностью 1. Тогда согласно (1)  $\Delta H = -\log 2 = 1$  бит.

Информационное напряжение не следует путать с информацией, которую нередко тоже измеряют в битах. В рассмотренном примере источник, имеющий напряжение 1 бит, способен передать сколько угодно информации объекту управления (зенитно-ракетной установке) в зависимости от времени, которым он будет располагать.

Информационное напряжение источника может изменять во времени свое значение или знак, если важность достижения цели неодинакова в различные моменты времени. Если это изменение происходит периодически с постоянным периодом  $T$ , как при работе автоматических систем в режиме автоколебаний, то такое переменное напряжение удобно характеризовать действующим значением

$$\Delta H_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\Delta H(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \log \left( \frac{P_{\text{всл}}}{P_0} \right) \right)^2 dt} = \sigma(\Delta H), \quad (2)$$

которое есть не что иное, как среднеквадратическое напряжение  $\sigma(\Delta H)$ . Наконец, при случайных изменениях сути сигнала  $x$

$$\Delta H_0 = \int_0^{\infty} f(x) \Delta H dx,$$

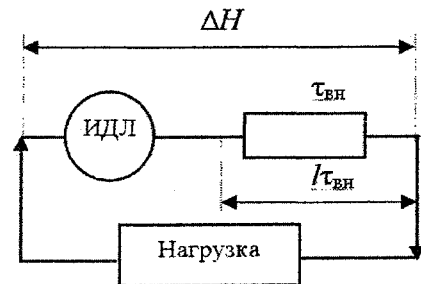
где  $\Delta H_0$  и  $\Delta H_{\text{д}}$  - среднее и действующее значения сущности сигнала;  $f(x)$  - плотность распределения вероятности  $x$ .

Выданная источником информация, как отмечалось выше, поступает к исполнительным органам и системам, которые являются информационной нагрузкой источника, а затем возвращается в источник в форме информации обратной связи. Если исполнительная система не обладает ни памятью, ни привычками, то единственной ее характеристикой в рассматриваемом аспекте является информационное сопротивление, то есть время ее реакции на полученную информацию (время исполнения), которое исчисляется от момента выхода управляющей информации из источника до момента получения источником сигнала обратной связи о достижении поставленной цели. Так, в человеческих системах управления, где распоряжения отдаются в устной форме, информационное сопротивление системы исполнения равно времени от момента, когда распоряжение сформулировано, до момента, когда поступил доклад об исполнении. При этом время, необходимое для принятия самого решения, для его изложения и для осмысленного восприятия доклада об исполнении, является внутренним информационным сопротивлением источника информации, обратным его пропускной способности  $I_{\text{макс}}$ .

Таким образом, для системы без привычек и памяти (рис. 2) имеет место информационный закон Ома

$$I = \Delta H / \tau_{\text{н}}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{н}} = \tau - \tau_{\text{вн}}$  - информационное сопротивление нагрузки;  $\tau$  и  $\tau_{\text{вн}}$  - информационные сопротивления соответственно всей цепи и источника (внутреннее),  $I$  - информационный ток в цепи нагрузки.



**Рис. 2. Простейшая информационная цепь**

Из (3) следует, что при однократном достижении цели сквозь систему проходит информация  $J$ , численно равная напряжению источника

$$J = I\tau_{\text{н}} = \Delta H. \quad (4)$$

При работе системы в течение времени  $T$  сквозь нее протекает информация

$$J = \int_0^T Idt = \int_0^T \frac{\Delta H}{\tau} dt. \quad (5)$$

Например, если при посадке самолета в его салоне зажигается и горит в течение времени  $T$  табло «Застегнуть ремни», а для исполнения команды нужно время  $\tau$ , то пассажиры получают информацию  $J = -T/\tau \cdot \log P$ , где  $P$  - вероятность самопроизвольного исполнения команды при внезапно испортившемся табло и отсутствии иных средств доведения команды до дисциплинированных пассажиров ( $P_{\text{усл}} = 1$ ).

Выражение (5) справедливо только в тех случаях, когда напряжение и ток не меняют знака. В тех же весьма частых случаях, когда напряжение и ток периодически изменяют знак, в (5) следует подставлять действующее значение тока, которое может быть определено следующим образом [1]:

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sigma(i), \quad (6)$$

где  $i$  - мгновенное значение информационного тока;  $T$  - период изменения тока.

Например, если передается последовательность команд «включить», «отключить» с периодом  $T$  и продолжительностью соответственно  $t_b$  и  $t_0$  (рис. 3), то соответствующие им положительные и отрицательные информационные напряжения  $\Delta H_b$  и  $\Delta H_0$  определяются соответствующими априорными вероятностями этих состояний объекта управления до подачи команд. При этом если время включения объекта составляет  $\tau_b$ , а время отключения  $\tau_0$ , то вышеприведенным напряжениям отвечают токи  $i_b = \Delta H/\tau_b$  в течение  $t_b$  и  $i_0 = \Delta H_0/\tau_0$  в течение  $t_0$ .

Воспользовавшись (6), получим действующее значение тока

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{t_b \Delta H_b^2}{\tau_b^2} - \frac{t_0 \Delta H_0^2}{\tau_0^2} \right)} = \sigma(i). \quad (7)$$

Естественно, что эффективность источника зависит от того, насколько быстро он выдает управляющую информацию при изменении состояния нагрузки. Запаздывание, имеющееся в источнике, обесценивает выданную им управляющую информацию и выполняет функции внутреннего информационного сопротивления источника.

Действительно, если при стрельбе по быстро движущимся целям источник управляющей информации медленно вычисляет координаты целей, то может случиться, что, когда он их выдаст, цель окажется уже вне пределов досягаемости средств поражения, иначе говоря, напряжение такого источника упадет практически до нуля и он будет бесполезен, хотя чисто теоретически, без учета запаздывания, он вычислял бы координаты целей со сверхвысокой точностью и на холостом ходу в отсутствие целей обладал бы весьма высоким напряжением. Это напряжение источника, которым он обладает на холостом ходу без информационной нагрузки, иными словами, без учета внутреннего сопротивления, мы будем называть *информа-*

*ционно-движущей логикой* (ИДЛ) источника. При наличии нагрузки информационный ток  $I$  создает падение напряжения на внутреннем сопротивлении  $\tau_{\text{вн}}$  (рис. 2), которое снижает ИДЛ до рабочего напряжения на величину  $I\tau_{\text{вн}}$ , так что

$$\Delta H = h - I\tau_{\text{вн}}, \quad (8)$$

где  $h$  - ИДЛ источника.

Таким образом, чем больше запаздывание в источнике (чем больше времени занимает процесс переработки информации и принятия решения), тем согласно (8) меньше его напряжение по сравнению с ИДЛ, а значит, тем меньше он способен изменить вероятность достижения цели управления. Это свойство усиливается по мере увеличения нагрузки, то есть по мере роста информационного тока. Поэтому при проектировании источника для работы на определенную нагрузку (на заданный информационный ток) приходится с учетом его внутреннего сопротивления завышать его ИДЛ на  $I\tau_{\text{вн}}$  с целью обеспечить заданную вероятность нужного события.

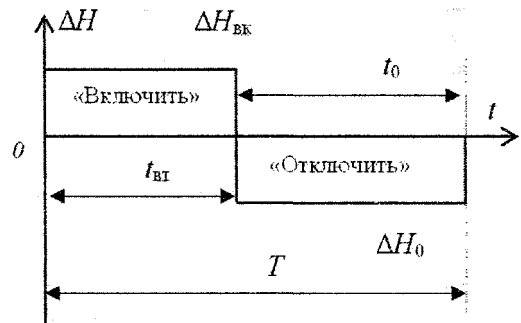


Рис. 3. Знакопеременная энтропия

Применительно к человеку ИДЛ характеризует его потенциальные творческие возможности при практически неограниченном времени, отведенном для принятия решений, а внутреннее информационное сопротивление человека характеризует быстроту соображения. Информационное же напряжение человека как источника информации определяется согласно (8) совокупным действием факторов. В результате часто весьма одаренные, но с замедленной реакцией люди оказываются беспомощными при оперативном управлении быстроизменяющимися ситуациями, обеспечивая сравнительно низкую вероятность достижения цели управления. Напротив, люди даже весьма ограниченные, но решительные и с хорошей реакцией, обладая низким информационным сопротивлением, способны при ограниченных значениях информационных токов обеспечить довольно успешное оперативное управление.

Однако положение изменяется радикальным образом, когда речь заходит о стратегическом планировании, на которое отводится достаточно времени, чтобы информационные токи были малы, а потери напряжения  $I\tau_{\text{вн}}$  даже при значительных  $\tau_{\text{вн}}$ , оставались несущественными. В этом случае

согласно (8)  $\Delta H \approx h$  и  $P_{\text{всл}} \approx P_h$ . Таким образом, здесь быстрота соображения не играет существенной роли, а высокая вероятность достижения цели обеспечивается только ИДЛ, то есть только талантом и опытом человека. Эти соображения следует принимать во внимание при распределении кадров по ступеням управленческой иерархии, на вершине которой принимаются относительно нечастые, зато весьма ответственные решения, а на нижних ступенях, напротив, принимаются не слишком важные решения, зато в большом числе и в ограниченное время.

В процессе работы часто применяют последовательное или параллельное соединение элементарных источников или нагрузок с целью соответственно увеличения ИДЛ или их пропускной способности.

**2. Соединения источников информации**

При последовательном соединении (рис. 4) через источники и нагрузку течет один и тот же информационный ток  $I$ , а их результирующее информационное напряжение равно сумме напряжений отдельных источников  $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$ , что увеличивает вероятность достижения желаемого события, так как  $\log(P/P_0) = \log(P_1/P_0) + \log(P_2/P_0) = \log(P_1 P_2 / (P_0)^2)$ .

Вместе с тем последовательное соединение источников приводит к увеличению их суммарного внутреннего сопротивления  $\tau_{\text{вн}} = \tau_1 + \tau_2$ , поэтому оно эффективно только в том случае, если суммарная задержка решения в источниках значительно меньше информационного сопротивления нагрузки  $\tau$ , представляющего собой время реакции исполнительного органа.

Это обстоятельство нужно учитывать при организации источников, в которых отделы (люди или автоматы) последовательно во времени осуществляют экспертизу (визируют) с разных точек зрения подготовленное одним из них решение, что, с одной стороны, повышает ИДЛ источника (вероятность достижения цели управления), но, с другой стороны, в случае длительной бюрократической волокиты в вышестоящих контрольных органах ( $\tau_{\text{вн}} \gg \tau$ ), может сделать бессмысленным существование последних, так как они, не увеличивая информационный ток, экономически обременительны.

В случае параллельного соединения (рис. 5) источники работают с одинаковым напряжением  $\Delta H$ , а в нагрузку поступает их суммарный ток  $I = I_1 + I_2$ .

Это имеет место, когда, например, главки одного министерства параллельно обеспечивают выполнение различных частей единого общего для министерства плана. В результате этого эквивалентное внутреннее сопротивление источников значительно снижается, т.е. практически сокращается время выработки ими управляющих решений по сравнению со случаем, когда всю разнородную

управляющую информацию должен выдать лишь один из источников.

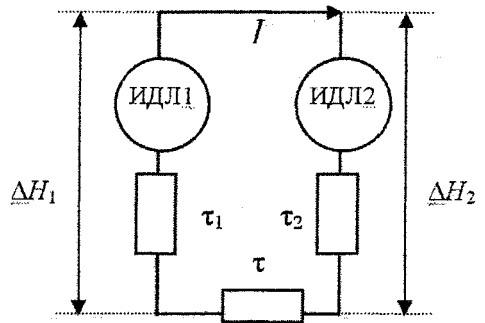
Действительно, если  $h_1 = h_2 = h$ , то имеет место соотношение  $I_1 \tau_1 = I_2 \tau_2 = I \tau$ , где  $I = I_1 + I_2$ , а  $\tau_{\text{вн}}$  - эквивалентное внутреннее сопротивление источников. Из этого соотношения, исключая токи, нетрудно получить

$$\tau_{\text{вн}} = \tau_1 \tau_2 / (\tau_1 + \tau_2)$$

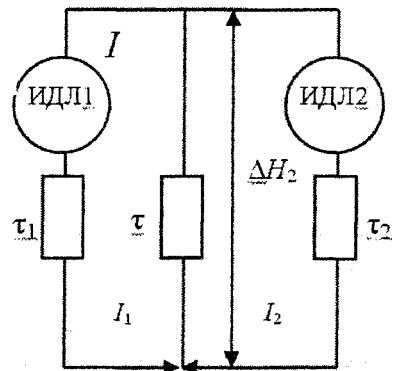
или

$$1/\tau_{\text{вн}} = 1/\tau_1 + 1/\tau_2. \tag{9}$$

Из (9) следует, что эквивалентное внутреннее сопротивление параллельных источников с одинаковыми ИДЛ меньше внутреннего сопротивления любого из них и что их эквивалентная проводимость (величина, обратная сопротивлению) равняется сумме проводимостей каждого из них. При этом ток через нагрузку составляет  $I = h/(\tau_{\text{вн}} + \tau)$ .



**Рис. 4. Последовательное соединение источников информации**



**Рис. 5. Параллельно соединение источников информации**

Однако этот эффект имеет место, если внутреннее сопротивление источников соизмеримо с сопротивлением нагрузки. В противном случае, когда  $\tau_{\text{вн}} \gg \tau$ , параллельные источники дают такой же ток, как и каждый из них в отдельности.

Отметим, что, как это следует из схемы (рис. 5), параллельное соединение источников только тогда выполняет свою роль, когда источники имеют равные ИДЛ, то есть равнокомпетентны в деле управления [3]. В противном случае тот из них, компетентность которого ниже других, сам становится для них нагрузкой и потребляет (вместо того, чтобы выдавать) управляющую инфор-

мацию, не только шунтируя основную нагрузку, но и перегружая остальные источники управляющей информации. Такое положение нередко складывается, когда в одной из сфер параллельного управления оказываются люди, не имеющие соответствующей профессиональной подготовки. Равная компетентность в вопросах управления необязательно подразумевает одинаковость их образования или положения в социальной структуре. Например, составитель программы для станка с программным управлением и разнорабочий, очищающий станок от стружки, окажутся равнокомпетентными, т.е. имеющими одинаковые ИДЛ, если вероятность сбоев в работе станка из-за ошибок программы окажется равной вероятности сбоев из-за попадания стружки в систему управления.

### 3. Соединения приемников информации

Как последовательно (рис. 6), так и параллельно (рис. 7) могут быть соединены и информационные сопротивления (нагрузки).

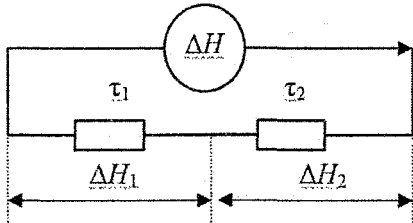


Рис. 6. Последовательное соединение нагрузок

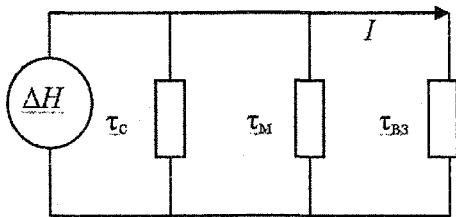


Рис. 7. Параллельное соединение нагрузок

При этом под последовательным соединением нагрузок понимается не схемная, а временная последовательность поступления информации в нагрузки, что характерно для временной селекции. О последовательном соединении можно говорить только тогда, когда информация от источника либо сначала поступает в первую нагрузку, и лишь после выполнения программы - во вторую, либо когда одна из нагрузок после выполнения своей программы сама передает ее другой нагрузке.

Так или иначе, общее время работы последовательно соединенных нагрузок должно равняться сумме времен отработки своих программ отдельными нагрузками, так что для схемы (рис. 6)  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ . При этом напряжение источника распределяется между нагрузками пропорционально сопротивлениям.

Соотношения, характеризующие схему (рис. 6), следующие:

$$\begin{cases} \Delta H_1 = I_1 \tau_1; \quad \Delta H_2 = I_2 \tau_2; \\ \Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2; \\ I = \Delta H / \tau; \quad \Delta H_1 / \Delta H = \tau_1 / \tau; \quad \Delta H_2 / \Delta H = \tau_2 / \tau. \end{cases} \quad (10)$$

В случае параллельного соединения нагрузок, то есть нескольких исполнительных органов, каждый из которых в состоянии в одиночку достичь цели, они одновременно получают управляющую информацию и одновременно исполняют операции, необходимые для достижения цели (рис. 7), соответственно сокращая время ее достижения.

В качестве параллельных основной нагрузке могут выступать посторонние нагрузки, создающие утечки информации. В такой роли нередко оказываются всевозможные контролирующие органы, которые иногда настолько перегружают источник требованием от него разных справок и отчетов, что он снижает свое напряжение, то есть снижает вероятность достижения своей прямой цели, поскольку не в состоянии параллельно обеспечивать информацией объект управления и контрольные органы. Конечно, когда такая параллельная работа запланирована заранее, то есть когда источник выбран в расчете на такую нагрузку, а контролирующие органы не превышают своих полномочий, напряжение источника соответствует требуемой вероятности достижения цели (надежности управления), но за счет выработки им избыточного (не необходимого для управления) информационного тока  $I_{ц}$ . Это можно обеспечить либо увеличив напряжение источника на  $\Delta H = I_{ц} \tau_{вн}$ , где  $\tau_{вн}$  - внутреннее сопротивление (время реакции) источника информации, либо уменьшив его внутреннее сопротивление до величины

$$\tau'_{вн} = \frac{I_{ц} \tau_{вн}}{I_{ц} + I_n},$$

где  $I_n$  - ток, необходимый полезной нагрузке.

Первая из указанных мер требует в случае только человеческого управления использования более квалифицированного управленческого персонала, а вторая требует увеличения штата сотрудников управления.

### 4. Реальные информационные цепи

Они нередко представляют собой сложные переплетения источников и приемников, не сводимые только к последовательным или параллельным соединениям. Это относится, прежде всего, к социальным системам, коллективам, каждый член которых, являясь одновременно приемником и источником информации, обменивается информацией практически с каждым из остальных членов, образуя сложное переплетение информационных связей.

К подобным цепям применимы информационные законы Кирхгофа, первый из которых выражает закон сохранения чувственной информации (принцип непрерывности тока) [3].

**Выводы**

1. Сущность управления, осуществляемого источником информации, характеризуется информационным напряжением.

2. Если важность достижения цели неодинакова в различные моменты времени, то информационное напряжение изменяет во времени свое значение или знак. Переменное напряжение удобно характеризовать его действующим значением.

3. Выданная источником информация поступает к исполнительным системам, которые являются информационной нагрузкой источника. Если исполнительная система не обладает ни памятью, ни привычками, то единственной ее характеристикой является информационное сопротивление. Причем здесь справедлив информационный закон Ома.

4. Эффективность источника зависит от величины запаздывания источника в выдаче управляющей информации при изменении состояния нагрузки. Это запаздывание выполняет функции внутреннего информационного сопротивления источника.

5. При проектировании источника для работы на определенную нагрузку необходимо завышать его ИДЛ на  $I\tau_{\text{вн}}$  с целью обеспечения заданной вероятности нужного события.

6. В процессе работы часто применяют последовательное или параллельное соединение элементарных источников или нагрузок с целью соответственно увеличения ИДЛ или их пропускной способности.

7. Высокая вероятность достижения цели обеспечивается только ИДЛ, то есть только талантом и опытом человека.

**Литература**

1. Горский Ю. М. Системно-информационный анализ процессов управления. - Новосибирск: Наука, 1988.

2. Горский Ю. М. Анализ некоторых основных понятий управления большими искусственными системами// Информация и управление. Философско-методологические аспекты: Сб. научных трудов. - М.: Наука, 1985.

3. Горский Ю. М. Моделирование с учетом человеческого фактора задачи менеджера, осуществляющего гомеостатическое управление// Гомеостаты и гомеостатические сети управления, их приложения в биологических, природных и технических системах. - Иркутск: СФ ВНЦХ АМН СССР, 1986.