

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ КЛАСТЕРНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

УДК 681.5.09

А.В. Гулай, В.М. Зайцев,  
БНТУ, г. Минск

## Аннотация

Выполнен анализ влияния основополагающих информационных факторов на процесс проектирования интеллектуальной мехатронной системы с цифровым управлением. В качестве информационного критерия эффективности управления в каждом цикле функционирования системы выбрана степень соответствия параметров векторов управления и результатов идентификации текущих состояний. На основе формального представления закона У.Р. Эшби о необходимом системном разнообразии предложен комплексный информационный подход к выработке и принятию системотехнических проектных решений. Данные решения обеспечивают существенные ограничения возможных негативных отклонений в поведении объекта управления и мехатронной системы после отработки управляющих воздействий.

## Введение

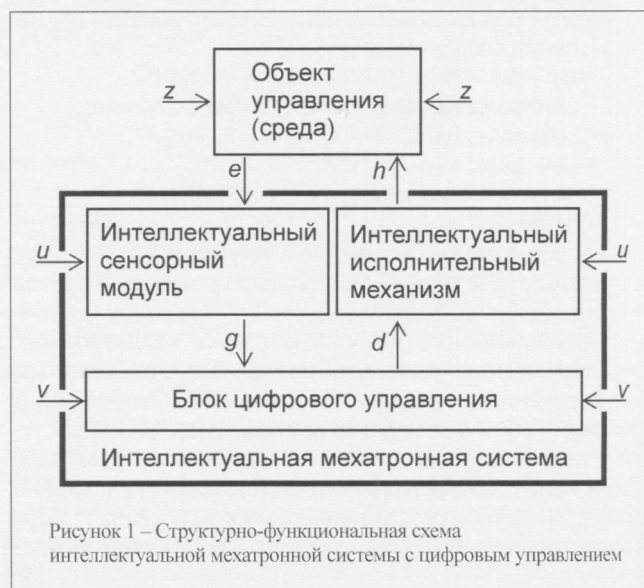
Эффективность функционирования интеллектуальных систем управления, в частности, интеллектуальных мехатронных систем, в существенной мере определяется корректностью и устойчивостью информационного взаимодействия всех ее компонентов и, следовательно, применяемыми информационными технологиями. В качестве основополагающего фактора, влияющего на процессы проектирования мехатронной системы с цифровым управлением, рассматривается общность информационных требований к ее интеллектуальным компонентам (подсистемам): сенсорному модулю, блоку цифрового управления, исполнительному механизму и системным каналам обмена данными. Технические характеристики основных компонентов такой системы должны обеспечивать их информационную совместимость на всех этапах осуществляемых преобразований: функционально-информационного; собственно информационного; информационно-функционального. Проблема информационной совместимости модулей мехатронной системы рассматривается при анализе всех видов сигналов, отображающих возможные состояния и воздействия в системе.

Достижение основного результата при функционировании интеллектуальной мехатронной системы предлагается оценивать получаемым информационным эффектом. При этом необходимо, в первую очередь, исследовать влияние информационных факторов на принятие проектных системотехнических решений при создании интеллектуальной мехатронной системы. Одной из первоочередных задач при разработке мехатронной системы является также определение параметров, которые способны достаточно полно и объективно характеризовать процессы получения и использования системной информации. Указанные положения выдвигаются на первый план в связи с усложнением логических структур и расширением функций востребованных практикой мехатронных систем с цифровым управлением, а также в связи с увеличением объемов циркулирующей в них и перерабатываемой ими системной информации.

## Учет информационных факторов в проектировании интеллектуальных мехатронных систем

Анализируемая обобщенная структурно-функциональная схема интеллектуальной мехатронной системы с цифровым управлением представлена на рисунке 1. Направления передачи информации указаны стрелками. Здесь приняты следующие условные обозначения сигналов и воздействий:  $e$  – контролируемые сигналы состояний объекта управления и системы;  $g$  – информационный вектор параметров состояний объекта управления и системы;  $d$  – вектор параметров ответных системных воздействий (вектор управления);  $h$  – управляющие воздействия на объект (среду) и систему;  $z, u, v$  – возмущающие воздействия.

При проектировании интеллектуальной мехатронной системы необходимо выполнение всех частных требований, предъявляемых к ее компонентам и к основным аспектам их технической совместимости, что является обязательным условием обеспечения согласованного функционирования подсистем. Однако даже при полном соблюдении указанных требований в мехатронной системе возможно информационное рассогласование ее составных частей и модулей. В качестве причин, приводящих к непредсказуемому изменению информации, циркулирующей в интеллектуальной мехатронной системе, и, следовательно, к негативным отклонениям в поведении объекта управления и системы, выступают различные возмущающие воздействия. Противодействие отрицательным явлениям и достижение информационного согласования компонентов интеллектуальной мехатронной системы на различных уровнях структуры и на разных этапах ее функционирования может быть достигнуто за счет применения



специальных методов и приемов из арсенала современных интеллектуальных системных технологий.

Разнообразие возможных состояний  $XS^*$  объекта управления и мехатронной системы определяется комбинациями текущих состояний основных составных частей с учетом влияния на них различных возмущающих факторов. В числе таких факторов могут быть флуктуации параметров объекта управления, изменения электромагнитных и механико-климатических условий или параметров функционирования сенсорного и актюаторного оборудования интеллектуальных модулей, воздействия помех на электронные компоненты цифрового блока управления, а также на системные каналы передачи информационных векторов  $g$  и векторов управления  $d$ . Очевидно, что множество состояний  $XS^*$  по своей природе является бесконечным.

Для реализации процессов цифрового управления множество  $XS^*$  в соответствии с целевыми задачами системы нуждается в предварительной кластеризации, чтобы каждому выделенному кластеру состояний можно было поставить в соответствие более предпочтительное состояние, или обеспечить неизменным текущее состояние, а при необходимости осуществить требуемый переход с помощью тех или иных сигналов и команд управления. Такой подход предполагает в каждом цикле управления выполнение операций сопоставления фактической информации текущего вектора  $g$  с результатами предварительной кластеризации. Это, в принципе, обеспечивает фактическое дискретное преобразование возможных исходных состояний объекта управления и системы, а также использование полученного дискретного базиса для идентификации состояний и выработки параметров (координат) векторов управления  $d$ .

Допустим, что для некоторой мехатронной системы  $S$  выполнена предварительная экспертная кластеризация множества  $XS^*$  и в соответствии с целевыми задачами выделено дискретное подмножество наиболее существенных и практически осуществимых системных состояний:

$$XS = \{XS_i\}, i = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

$$XS \in XS^*. \quad (2)$$

Кроме того, в этом же множестве на основе наборов целевых критериев, характерных для систем конкретного функционального назначения, априорно выделено дискретное подмножество наиболее предпочтительных (или благоприятных) состояний:

$$X = \{X_j\}, j = 1, 2, \dots, m; \quad (3)$$

$$X \in XS \in XS^*. \quad (4)$$

Разнообразие и параметры элементов структуры мехатронной системы с цифровым управлением должны, с одной стороны, обеспечивать полноценное отображение выделенных дискретных состояний, а с другой стороны, реализовать наиболее правдоподобную идентификацию состояний по текущим параметрам информационных векторов  $g$  [1]. В идеальном случае требуется, чтобы неопределенность относительно текущего состояния объекта управления и системы полностью отсутствовала, а оценка нахождения их в фактическом состоянии выполнялась с вероятностью, равной 1.

В качестве информационного критерия эффективности управления в каждом цикле работы системы целесообразно выбрать степень соответствия синтезированных параметров вектора управления  $d$  результатам идентификации текущего состояния. Управляемость и соответствующее ограничение возможного разнообразия в поведении объекта управления и системы может быть достигнуто исключительно за счет выработки системой достаточного количества различных векторов управления  $d$ , реализуемых с помощью наборов сигналов и команд.

Будем полагать, что мехатронная система управляема и при отработке очередного вектора управления  $d_t$  она целенаправленно переходит из текущего состояния  $XS_i$  в более предпочтительное состояние  $X_j$  или сохраняется в текущем состоянии. Векторы управления выбираются из допустимого множества  $D = \{d_t\}; t = 1, 2, \dots, w$ . В соответствии с формальным представлением закона У.Р. Эшби о необходимом разнообразии, системное управление осуществимо и действенно только при соблюдении условия энтропийного баланса [2]:

$$H(X) \geq H(XS) - H(D) + H(XS/D); \quad (5)$$

$$H(D) - H(XS/D) = I(D, XS). \quad (6)$$

Здесь,  $H(X)$ ,  $H(XS)$ ,  $H(D)$  – значения безусловной энтропии, характеризующие, соответственно, разнообразие множества выборов наиболее предпочтительных состояний  $X$ , разнообразие множества возможных состояний объекта управления и системы  $XS$  и множества векторов управления  $D$ ;  $H(XS/D)$  – условная энтропия, характеризующая неопределенность состояния объекта после выбора и отработки исполнительным механизмом вектора управления;  $I(D, XS)$  – количество информации в цифровом блоке управления относительно множества  $XS$ .

Данное условие устанавливает тот факт, что при управлении энтропию состояний объекта можно понизить исключительно на величину содержащейся в блоке управления информации относительно возможных состояний. В информационном аспекте, это условие указывает на невозможность снижения энтропии при отсутствии управления, что, в определенной степени, соответствует второму началу термодинамики о невозможности невосполняемого кругового энергообмена. Для реализации управления необходимо принятие таких системных проектных решений, которые обеспечивают ограничения возможного разнообразия в поведении объекта управления, и, следовательно, минимизируют энтропию  $H(X)$ . Естественным путем уменьшения энтропии  $H(X)$  является снижение безусловной энтропии  $H(XS)$  объекта управления и системы.

### Кластеризация системоразличимых состояний объекта управления в мехатронной системе

Обычно на основе предварительного моделирования процессов функционирования мехатронной системы  $S$ , последующего системного анализа и экспертной кластеризации могут быть выделены и специфицированы существенные системоразличимые состояния  $\{XS_i\}; i = 1, 2, \dots, n$ , а также оценены ожидаемые вероятности  $\{PS_i\}; i = 1, 2, \dots, n$

нахождения в этих состояниях. Для функционально полного множества возможных состояний необходимо, чтобы

$$\sum_{i=1}^n PS_i = 1. \quad (7)$$

В этом вопросе важнейшее значение имеет схема кластеризации, которая активно влияет на построение алгоритмов функционирования цифрового блока в цепи управления системы. Анализ показывает, что эффективные результаты можно ожидать, прежде всего, при использовании эвристико-алгоритмических методов и приемов в интеллектуальных технологиях проектирования [1]. В настоящей работе для выполнения кластеризации состояний  $XS$  предлагается применить достаточно универсальный допусковый принцип, многократно апробированный в различных непрерывных (аналоговых) системах контроля электромеханического и электронного оборудования [3].

Состояние объекта управления и мехатронной системы в каждом цикле функционирования естественно оценивать по текущим значениям параметров (координат) информационных векторов:

$$g_v = (\alpha_{1v}, \alpha_{2v}, \alpha_{3v}, \dots, \alpha_{rv}), \quad (8)$$

которые формируются измерительными трактами системы на основании сигналов сенсоров. В состав вектора  $g$  должны включаться (в терминологии У.Р. Эшби) только «главные параметры» [2]. На стадии системного анализа целесообразно полагать координаты данного вектора взаимно независимыми, что соответствует наихудшим условиям оценки энтропии  $H(XS)$ . Для формирования возможных состояний  $XS$  необходим набор значений ожидаемых вероятностей нахождения каждого из параметров в пределах (границах) требуемых допусков  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_r$ , где  $\{\pi_z\}$ ;  $z = 1, 2, \dots, r$  – вероятности благоприятных событий [3]. При этом, указанные параметры находятся в диапазоне  $\alpha_{zv} \in (\alpha_{zn}, \alpha_{zv})$ ;  $\alpha_{zn}, \alpha_{zv}$  – требуемый нижний и верхний пределы допуска параметра  $\alpha_z$  для  $z = 1, 2, \dots, r$ .

Состав «главных параметров» и пределы требуемых допусков задаются экспертами – высококвалифицированными системными аналитиками в области создания и использования мехатронных систем конкретного функционального назначения. Набор ожидаемых вероятностей нахождения каждого из параметров в пределах требуемых допусков устанавливается путем моделирования процессов формирования и получения блоком цифрового управления векторов  $g_v = (\alpha_{1v}, \alpha_{2v}, \alpha_{3v}, \dots, \alpha_{rv})$ . Существенными и определяющими факторами, которые влияют на вероятности  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_r$ , являются чувствительность сенсоров, точностные параметры трактов измерения, достоверность передачи параметров векторов  $g$  по системным каналам в цифровой блок управления, техническая надежность аппаратуры, алгоритмы оцифровки и обработки измерительной информации.

При размерности  $r$  информационного вектора  $g$  максимальное количество дискретных состояний объекта управления и системы, которые могут быть выделены при использовании предлагаемой схемы кластеризации, равно  $2^r$ . Первое состояние  $XS_1$  множества  $XS$  задается как состояние нахождения всех параметров вектора  $g$  в пределах требуемых допусков. Такое состояние является единственным и в циклах управления реализуется с вероятностью

$$PS_1 = N \prod_{k=1}^r \pi_k, \quad (9)$$

где  $N$  – коэффициент нормирования, который определяется значением

$$N = 1 / \left[ \prod_{k=1}^r \pi_k + \sum_{p=1}^r (1 - \pi_p) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{r-1} \pi_k + \dots + \prod_{k=1}^r (1 - \pi_k) \right]. \quad (10)$$

Ко второй группе состояний  $XS_2, XS_3, \dots, XS_{(r+1)}$  могут быть отнесены состояния нахождения всех параметров вектора  $g$ , за исключением любого одного параметра, в пределах требуемых допусков. Количество таких состояний  $r$  и вероятность их реализации равна

$$PS_i = N (1 - \pi_p) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{r-1} \pi_k, \quad i = 2, 3, \dots, r, r+1 \quad (11)$$

К третьей группе относятся состояния  $XS_{(r+2)}, XS_{(r+3)}, \dots, XS_{(r(r-1)/2+2)}$  нахождения всех параметров вектора  $g$ , за исключением любых двух параметров, в пределах требуемых допусков. Количество таких состояний равно  $r(r-1)/2!$  и вероятность их реализации составляет

$$PS_i = N (1 - \pi_p) (1 - \pi_q) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq p, k \neq q}}^{r-2} \pi_k, \quad i = r+2, r+3, r(r-1)/2!+2 \quad (12)$$

для  $p = 1, 2, 3, \dots, r$ ;  $q = 1, 2, \dots, r$ ;  $p \neq q$ .

Аналогичным образом строятся остальные группы состояний с номерами 4, 5, ...,  $(r-1)$ , кроме последней. К последней группе с номером  $r$  может быть отнесено состояние нахождения всех параметров вектора  $g$  вне пределов требуемых допусков. Такое состояние является единственным и в циклах управления оно реализуется с вероятностью

$$PS_r = N \prod_{k=1}^r (1 - \pi_k). \quad (13)$$

Энтропия  $H(XS)$ , характеризующая разнообразие множества возможных состояний объекта управления и системы  $XS$ , задается следующим соотношением [4]:

$$H(XS) = - \sum_{i=1}^{n=2^r} PS_i \log PS_i. \quad (14)$$

Если координаты информационного вектора  $g$  составлены действительно из «главных параметров», а второстепенные, третьестепенные и другие малозначащие параметры экспертами отсеяны, то фактическое уменьшение энтропии  $H(XS)$  принципиально возможно с использованием следующих способов:

- с помощью огрубления информации и искусственного уменьшения размерности  $r$  информационного вектора;
- за счет дополнительной иерархической кластеризации состояний на втором или на более высоких уровнях;
- путем введения иерархии уровней управляющих воздействий в нисходящем процессе ответных системных реакций.

Уменьшение размерности информационного вектора может быть реализовано путем установления практической границы системной различимости состояний, при этом специфицируется первое состояние, состояния второй группы, состояния третьей группы и так далее до границы различимости. Остальные состояния заменяются одним укрупненным состоянием с суммарной вероятностью реализации. Такой способ ведет к упрощению алгоритмов функционирования цифрового блока управления и к сокращению общего времени выработки ответных реакций. Правомерность указанного проектного решения определяется экспертами в зависимости от конкретного функционального назначения мехатронной системы. Однако этот прием уменьшения энтропии допустим не для всех классов и типов мехатронных систем.

Дополнительное введение иерархии состояний или управляющих воздействий ведет к усложнению структуры множества  $XS$ , и, следовательно, к неизбежному усложнению мехатронной системы. Такой прием снижения энтропии сопровождается увеличением продолжительности (по времени) выработки управляющих воздействий.

**Выбор информационных векторов управления в интеллектуальной мехатронной системе**

Следует отметить, что принятие проектных решений по построению цифрового блока управления в рассматриваемом системном аспекте на основе строгих расчетно-аналитических методов в общем случае вряд ли возможно. Эффективными практическими направлениями использования предлагаемого информационного подхода являются:

- комплексное применение знаний экспертов, наиболее полное введение их знаний в процесс проектирования мехатронной системы;
- сопоставление расчетных оценок энтропии  $H(XS)$  для возможных альтернативных решений в создании интеллектуальной мехатронной системы;
- моделирование с целью принятия окончательного системного варианта при построении цифрового блока управления создаваемой системы.

Моделирование процессов управления позволяет оценить вероятности  $\{P_{ij}\}; i = 1, 2, \dots, n = 2^r; j = 1, 2, \dots, m$  выбора в циклах управления для различных исходных системных состояний  $XS_i$ , тех или иных, наиболее благоприятных, по мнению системных аналитиков, состояний

$$\sum_{j=1}^m P_{ij} = 1. \tag{15}$$

Достижение требуемых состояний может быть реализовано за счет целенаправленного применения различных вариантов системных решений и соответствующих им управляющих векторов и воздействий. При комплексном информационном описании процессов управления целесообразно использование для различных пар системных состояний  $\{XS_i, X_j\}$  метода экспертного задания вероятностей  $\{P_{t/ij}\}; t = 1, 2, \dots, w; i = 1, 2, \dots, n = 2^r; j = 1, 2, \dots, m$  выбора в циклах управления допустимых векторов управления  $d_t \in D$ , ко-

торые обеспечивают перевод системы в благоприятные состояния. Таким образом, может быть сформирован вероятностный параллелепипед, на основе которого порождаются основные компоненты энтропийного баланса процессов управления в системе (рисунок 2). При этом, число возможных управляющих воздействий определяется произведением  $n = 2^r m w$ .

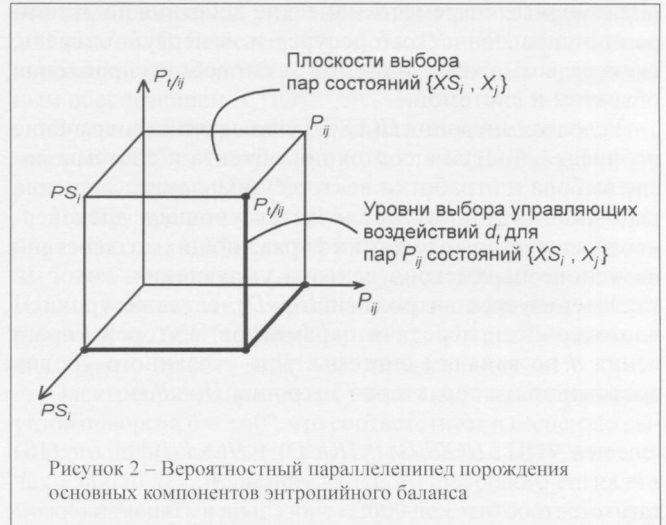


Рисунок 2 – Вероятностный параллелепипед порождения основных компонентов энтропийного баланса

Полная энтропия выбора управляющих воздействий из множества  $D$  для обеспечения всех пар состояний  $\{XS_i, X_j\}$  требует сложения частных энтропий по всем элементам множества  $D, X, XS$ :

$$H(D) = - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2^r} P_{t/ij} \log P_{t/ij}, \tag{16}$$

где  $P_{t/ij}$  – полная вероятность выбора управляющего воздействия  $d_t$  в точке  $\{XS_i, X_j\}$ .

В реальных условиях, для большинства систем вероятностные процессы выбора благоприятных системных состояний и вероятностные процессы выбора векторов управления с приемлемым уровнем приближения могут считаться статистически независимыми. Поэтому допустимо полагать, что  $P_{t/ij} = P_{t/ij} P_{ij}$ , в этом случае выражение (16) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} H(D) &= - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2^r} (P_{t/ij} P_{ij}) \log(P_{t/ij} P_{ij}) = \\ &= - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2^r} (P_{t/ij} P_{ij}) \log P_{t/ij} - \\ &\quad - \sum_{t=1}^w \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n=2^r} (P_{t/ij} P_{ij}) \log P_{ij}. \end{aligned} \tag{17}$$

Для минимизации энтропии  $H(X)$  необходимо принятие проектных решений, при которых  $H(D) \rightarrow H(XS)$ . Следует учитывать тот факт, что при использовании предложенной схемы кластеризации наблюдается сужение области допустимого выбора более благоприятного состояния  $X_j$  для некоторого исходного состояния  $XS_i$  в

плоскостях  $\{XS_i, X_j\}$ . Данная область ограничивается номерами групп, к которым относятся состояния  $XS_i$ . Действенное и рациональное управление  $d_i$  должно сопровождаться переводом объекта и системы в состояния только тех групп, которые имеют меньшие номера. В связи с этим, в техническом отношении необходимо не простое формальное изменение уровня неопределенности в выборе векторов управления, а, прежде всего, планомерные системотехнические действия по расширению управленческого ресурса и, в первую очередь, спектра возможных приемов и способов управления объектом и системой.

Условная энтропия  $H(XS/D)$  указывает на сохранение неопределенности в состоянии объекта и системы после выбора и отработки вектора управления. Значение условной энтропии определяется уровнем достоверности адекватной отработки управляющих воздействий на основе параметров вектора управления, который характеризуется энтропией  $H(h/D)$ , а также уровнем достоверности передачи параметров векторов управления  $d$  по каналам системы. Для указанного уровня достоверности характерна энтропия  $H(\Delta d/d)$ :

$$H(XS/D) = H(h/D) + H(\Delta d/d), \quad (18)$$

где

$$H(h/D) = - \sum_{i=1}^w \sum_{l=1}^L Q_{il} \log Q_{il}, \quad (19)$$

$Q_{il}$  – вероятность адекватной отработки исполнительным механизмом параметра  $\beta_{il}$  вектора управления

$$d_i = (\beta_{1i}, \beta_{2i}, \dots, \beta_{li}). \quad (20)$$

Применение эффективных корректирующих кодов в зависимости от типов системных каналов (волоконно-оптических, проводных или радиоканалов) позволяет существенно повысить достоверность передачи информационных векторов  $g$  и векторов управления  $d$ , но не обеспечивает абсолютной достоверности передаваемой информации – во всех случаях  $H(\Delta d/d) \neq 0$  [5]. Следует подчеркнуть также, что составляющую  $H(XS/D)$  энтропийного баланса необходимо рассчитывать для каждого альтернативного технико-алгоритмического решения и применять вариант, минимизирующий эту составляющую [5–8].

### Заключение

Предлагается достижение основного результата при функционировании интеллектуальной мехатронной системы оценивать получаемым информационным эффектом. При этом, в качестве основополагающего информационного фактора, влияющего на процесс проектирования мехатронной системы с цифровым управлением, рассматривается общность информационных требований к ее интеллектуальным компонентам. Информационным критерием эффективности управления в каждом цикле функционирования мехатронной системы выбрана степень соответствия параметров векторов управления, синтезируемых системой, и результатов идентификации ее текущих состояний.

На основе формального представления закона У.Р. Эшби о необходимом системном разнообразии предложен информационный кластерный подход к выработке и принятию системотехнических проектных решений. Для формирования возможных состояний используется набор значений ожидаемых вероятностей нахождения каждого из параметров объекта управления и мехатронной системы в пределах требуемых допусков. Показано, что при информационном кластерном описании процессов управления целесообразно использование экспертной оценки вероятности выбора допустимых векторов управления, которые обеспечивают перевод системы в благоприятные состояния.

### Литература:

1. Гулай, А.В. Интеллектуальные технологии синтеза стратегических решений при создании сложных систем / А.В. Гулай, В.М. Зайцев // Электроника инфо. – 2014. – № 5.
2. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику / У.Р. Эшби. – М. : Иностранная литература, 1959.
3. Карибский, В.В. Основы технической диагностики / В.В. Карибский, П.П. Пахоменко, Е.С. Согомонян, В.Ф. Халчев. – М. : Энергия, 1976.
4. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969.
5. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М. : Иностранная литература, 1963.
6. Смит, С. Цифровая обработка информации / С. Смит. – М. : Издательский дом «ДодЭка-XXI», 2008.
7. Феер, К. Беспроводная цифровая связь / К. Феер. – М. : Радио и связь, 2000.
8. Кларк, Д. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Д. Кларк, Д. Клейн. – М. : Радио и связь, 1987.

### Abstract

During mechatronic system functioning it is proposed to assess achievement of the main result by means of the obtained information effect. Being so, commonality of informational requirements to intellectual components of the system is considered to be the basic informational factor influencing the process of mechatronic system design with digital control. The degree of conformity of controlling vectors parameters, which are synthesized by the system, and the results of identifying its current states has been selected as the informational criterion of control efficiency in each cycle of informational system functioning.

On the basis of the formal representation of the W.R. Ashby's law on the required systematic variety the informational cluster approach is proposed for elaboration and adoption of systems engineering design solutions. In order to form possible states a set of values of expected probabilities is used for achievement of each parameter location in the control object and the mechatronic system within the required tolerances. It is shown that during informational cluster description of control processes the use of expert assessment of selecting the allowed control vectors is expedient for provision of system transfer to favorable states.

Поступила в редакцию 16.06.2015 г.