

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**Резчиков А.Ф.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
rw4cy@mail.ru

**Кушникова Е.В., Кушников О.В.**

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Саратов, Россия*  
lkushnikova@gmail.com

**Богомолов А.С.**

*Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия*  
alexbogomolov@yandex.ru

*Аннотация. Анализ закономерностей целенаправленной деятельности, осуществляемой при проектировании сложных систем, позволяет представить процесс достижения целей проектирования в виде управляемого процесса и определить его входные и выходные координаты, инвариантные к характеру деятельности, ее продолжительности и масштабам. При достижении целей проектирования значения входных координат данного процесса неоднократно изменяются лицом, принимающим решения, что может привести к значительным отклонениям от желаемых результатов. В статье разработана постановка задачи определения возмущений управляющих координат, не приводящих к отклонению от запланированных результатов.*

*Ключевые слова: сложные системы, человеко-машинные системы, проектирование сложных систем, системная динамика.*

### Введение

Процесс проектирования представляет собой распространенный вид целенаправленной управляемой деятельности, включающий замысел, подготовку к действию, принятие решения, действие и заканчивающийся результатом [1]. Одним из наиболее ответственных и неформализованных этапов данного процесса является формирование целей проектирования, трактуемых как желаемый результат деятельности, достижимый в пределах некоторого интервала времени [2]. Данная интерпретация целей позволяет сделать вывод, что в процессе целенаправленной деятельности лицом, принимающим решения, осуществляется отображение  $f: Z \rightarrow A$  ( $Z$ - множество целей проектирования;  $A$  - множество результатов деятельности).

С позиций теории управления под результатами деятельности понимается:

- переход разрабатываемой системы после завершения процесса проектирования в область  $A' \in A$ , назначенную в зоне ее существования в  $n$ -мерном фазовом пространстве, характеризующем состояние системы и среды, к достижению которых стремится лицо, принимающее решения;
- реализация выбранной траектории  $Y'$  перехода системы в область  $A'$  в условиях возмущения фазовых координат;
- переход системы в область  $A'$  и реализация выбранной траектории перехода  $Y'$ .

Обобщенный в [3] опыт управления системами различного назначения и уровня сложности показал, что для оценки результата реализации произвольной цели  $Z_i \in Z$  эксперту достаточно установить значения характеристик цели  $\{m_i\}_1^4$ , определяющих, соответственно, «что», «где», «когда», и «каким образом» будет предпринято для достижения  $Z_i$ . Если в процессе достижения цель  $Z_i$  декомпозируется на некоторую совокупность более простых целей  $\{Z_i\}$ , то для оценки результата эксперт дополнительно использует характеристику  $m_5$ , определяющую очередность реализации отдельных целей из  $\{Z_i\}$ .

Отмеченные особенности целенаправленной деятельности, осуществляемой в системах управления проектами, позволяют рассматривать процесс движения в направлении достижения целей проектирования как некоторый управляемый процесс, схематическое изображение которого представлено на Рис. 1.

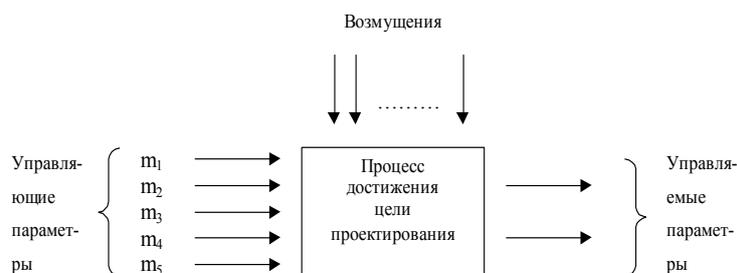


Рис.1 Управление процессом достижения цели проектирования

Независимо от характера, продолжительности и масштабов целенаправленной деятельности, осуществляемой при управлении проектом, управляющими координатами процесса достижения целей являются характеристики  $\{m_i\}_1^5$ , управляемыми – координаты области  $A'$  и/или траектории  $Y'$ . В качестве возмущений выступают непредвиденные изменения требований, предъявляемых к проектируемой системе, условий ее функционирования, характеристик окружающей среды и т.д. [4]. Векторы управляющих, управляемых координат и возмущений являются функциями времени.

К особенностям целенаправленной деятельности относится также то обстоятельство, что между этапами формирования и достижения целей проектирования всегда проходит определенный интервал времени  $\Delta t$ . Анализ жизненного цикла современных технологий [5] показал, что при проектировании сложных систем продолжительность  $\Delta t$  составляет многие месяцы. За это время непосредственные исполнители проектных работ или их руководители могут неоднократно изменить первоначальные значения характеристик  $\{m_i\}_1^5$  у различных целей проектирования, обосновывая данные действия производственной необходимостью, изменившимися внешними условиями, стечением обстоятельств и т.д. В сложившейся ситуации лицу, принимающему решения, необходимо уже в начале проектных работ определить условия, обеспечивающие нечувствительность управляемых координат  $A'$  и  $Y'$  к малым возмущениям управляющих параметров  $\{m_i\}_1^5$ . Это позволит более объективно оценить допустимость изменений, вносимых в проекты сложных технических систем, и более точно определить область применения типовых проектных решений.

В настоящее время эти действия осуществляется экспертами в основном на интуитивном уровне, т.к. использование моделей и методов количественного анализа, традиционно применяемых в теории управления для решения подобных задач и ориентированных на получение строгих количественных результатов, в данном случае неоправданно, ввиду низкого уровня точности входной информации, наличия неопределенностей и качественного описания ряда зависимостей рассматриваемой предметной области [6].

Использование моделей и методов, основанных на анализе структурных характеристик процесса достижения целей проектирования, являющихся наиболее общими для различных проектируемых систем, консервативными и мало изменяющимися во времени, позволяет избежать указанных сложностей [7-14].

Статья посвящена разработке моделей, методов и алгоритмов определения возмущений у управляющих координат процесса достижения целей, не приводящих к отклонению от запланированных результатов проектирования. Полученные результаты, по мнению авторов, могут быть использованы при разработке математического обеспечения систем управления проектами, интеллектуальных систем автоматизированного проектирования и систем оперативного управления производственными процессами.

## 1. Постановка задачи

Допустим, что в процессе проектирования сложной системы необходимо осуществить цели  $\{Z_i(t)\}$  для достижения желаемого результата  $A'$  и/или  $Y'$ . Пусть степень совпадения результатов целей в  $A'$  оценивается при помощи известной метрики  $\rho_A$ . Возможность формирования подобных метрик, характеризующих близость-удаленность информационных единиц внутри некоторого семантического пространства, отмечалась в литературе, например, [8]. Тогда формализованная постановка решаемой задачи сводится к проверке на временном интервале  $[t_H, t_K]$  при любых допустимых состояниях среды  $x(t) \in X(t)$  и управляющих воздействиях  $\{m_i\}_1^5 \in M$  следующих условий, обеспечивающих отсутствие изменений у результатов целей проектирования при возмущениях координат  $\{m_i\}_1^5$ .

### 1.1. Вариант 1

Результатом является переход системы в заданную область  $A' \in A$ . Условие неизменности результата при возмущении  $\{m_i\}_1^5$ :

$$J_1 = \int_{t_H}^{t_K} \rho_a(\{Z_i(t)\}, A') dt = 0; Z_i(t) = Z_i(x(t), \{m_i(t)\}_1^5); \rho_a \in \rho; \quad (1)$$

$$F_L^{(t_H)}(x(t), \{m_i(t)\}_1^5) = 0; L = \overline{1, A_1}; F_L^{(t_K)}(x(t), \{m_i(t)\}_1^5) = 0; L = \overline{A_1 + 1, A_2};$$

### 1.2. Вариант 2

Результатом цели проектирования является достижение выбранной траектории  $Y'$  перехода системы в заданную область  $A'$ . Условие неизменности результата при возмущении  $\{m_i\}_1^5$ :

$$J_2 = \int_{t_H}^{t_K} (Y'(x(t), \{m_i(t)\}_1^5) - Y_1(t)) dt = 0; Y' \in Y; \quad (2)$$

$$F_L^{(t_H)}(x(t), \{m_i(t)\}_1^5) = 0; L = \overline{A_3, A_4}; F_L^{(t_K)}(x(t), \{m_i(t)\}_1^5) = 0; L = A_4 + 1; A_5$$

### 1.3. Вариант 3

Результатом является переход системы в заданную область  $A'$  и реализация выбранной траектории перехода  $Y'$ . Условие неизменности результата при возмущении  $\{m_i\}_1^5$ , определяется выражениями (1) и (2). ( $X, M$ -множества допустимых состояний среды и управляющих воздействий  $\{m_i\}_1^5$ , соответственно;  $\rho, Y$  - множества допустимых изменений  $\rho_A$  и  $Y'$ , соответственно;  $A_1 - A_5$  - известные константы;  $F_L^{(t_H)}, F_L^{(t_K)}$  - граничные условия;  $Y_1$  - реализованная траектория перехода системы в  $A'$ ).

## 2. Математическая модель

Для решения поставленной задачи необходимо разработать математическую модель, связывающую возмущения управляющих координат  $\{m_i\}_1^5$ , с изменениями результатов целей проектирования. Будем использовать два вида формальных моделей целей проектирования: внешнюю, представленную в терминах универсального семантического кода, и внутреннюю, имеющую графовую форму. Первая модель используется экспертами непосредственно при формировании, анализе и коррекции данных, характеризующих цель проектирования; вторая – строится по внешней модели и применяется при разработке формальных методов решения задачи.

При разработке формальных моделей делаются следующие допущения: набор управляющих координат  $\{m_i\}_1^5$  полон; управляющие координаты набора не являются взаимоисключающими; отдельные координаты набора не взаимосвязаны.

Внешняя модель. В основу разрабатываемых моделей положено определение элементарной цели ( $E_Z$ ). Анализ целеобразующей информации, учитываемой экспертами при формировании цели проектирования, позволил представить  $i$ -ю элементарную цель управления в терминах аппарата синтагматических цепей в виде конструкции:

$$Ez_i r_1 (P' r_2 Bed_{Ez} r_2 S_1 r_2 S_2 \dots r_2 S_N);$$

$$(S_i r_1 (P_1 r_2 P_2 r_2 Bed_{S_i} r_2 R_{S_i})) r_3 (P_1 r_2 P_2 r_2 Bed_{S_i}); i = 1, N;$$

$$R_{S_i} r_1 (R_{S_i}^1 r_2 \Delta T_1 r_2 R_{S_i}^2 r_2 \Delta T_2 \dots r_2 R_{S_i}^k r_2 \Delta T_k); \quad (3)$$

$$\psi r_1 (P'_i r_4 ((S_1 r_4 S_2) r_2 (S_1 r_4 S_3) r_2 \dots r_2 (S_{n-1} r_4 S_n)),$$

а модель совокупности из  $n$  элементарных целей в виде выражения:

$(Ez_1 r_2 Ez_2 r_2 Ez_3 \dots r_2 Ez_n)$  ( $P$ - формулировка цели;  $Bed_{Ez}$ - признак существования цели;  $S_1, \dots, S_n$ - свойства цели;  $r_1, r_2, r_3, r_4$ - отношения «состоит из», «быть одновременно», «быть альтернативой», «зависит от», соответственно).

Условие существование цели задается продукционной моделью, формируемой экспертами по известным методикам. В качестве свойств  $S_i$  выбрано конечное число свойств объекта, среды и системы управления, которые учитываются ЛППР при реализации конкретной  $E_Z$ .

Свойство  $S_i$  состоит из следующих элементов:  $\{P_1, P_2, Bed_{S_i}, R_{S_i}\}$ , где  $P_1$ - наименование свойства;  $P_2$  - наименование объекта;  $Bed_{S_i}$  - условие, при выполнении которого влияние  $S_i$  на  $E_z$  учитывается ЛПП;  $R_{S_i}$  - ранг, характеризующий степень влияния  $S_i$  на ход операции. Условие  $Bed_{S_i}$  формируется аналогично  $Bed_{E_z}$ .

Внутренняя модель. Данная модель представляют собой динамический графоид  $G(U(t), E(t), Q(t))$  с изменяющимся во времени множеством вершин  $U = Y_{i=1}^{z_n} B_i$ , ребер  $E$ , соответствующих отношению  $R^*$ , заданному на  $Y_{i=1}^{z_n} B_i$ , и весов дуг  $Q$ , равных рангу свойств  $S_i$  множества  $Y_{i=1}^{z_n} S_i$ , где  $n_z$  - количество  $E_z$  в совокупности целей. Процедура формирования графовой модели элементарной цели по ее внешней модели имеет следующий вид:

Определить  $\langle S_1 \rangle, \langle S_2 \rangle, \dots, \langle S_N \rangle$  и  $\forall \langle S_i \rangle, i = 1, N$ , поставить в соответствие каждой характеристике  $\langle S_i \rangle$  набор рангов  $\langle R_{S_i}^1 \rangle, \langle R_{S_i}^2 \rangle, \dots, \langle R_{S_i}^k \rangle$ .

Построить  $\|A_n\| = \|a_{nn}^*\|$ , таким образом, чтобы выполнялось:  $a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i R S_j; \\ 0, & \text{если } S_i \bar{R} S_j, \end{cases}$

( $\bar{R}$ - отношение «неэквивалентно»);

Удалить из квадратной матрицы  $\|A_n\|$  повторно встречающиеся столбцы и строки.

Для оставшихся  $S_j, j = 1, k$  построить квадратную матрицу  $\|A_n\| = \|a_{kk}\|$  таким образом, чтобы:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i R S_j; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (R^* - \text{бинарное отношение «нетранзитивно влияет»).$$

Построенная в результате выполнения данной процедуры квадратная матрица  $\|A_k\|$  представляет собой по определению матрицу смежности графовой модели элементарной цели.

### 3. Метод решения

Из анализа подынтегрального выражения (1) и (2) следует, что для решения задачи достаточно проверить выполнения следующих условий:

$$\text{для первого варианта } \forall t [t_H, t_k] \rho_a(\{Z_i(t)\}, A') = 0; \quad (4)$$

$$\text{для второго варианта } \forall t \in [t_H, t_k] Y'(x(t), \{\{m_i\}_1^5\}) - Y_1(t) = 0; \quad (5)$$

(4) и (5) - для третьего варианта.

Без потери общности, примем в отношении области  $A'$  ряд допущений, упрощающих методику решения задачи:

- область  $A'$  содержит только одну точку  $a$ ;
- точка  $a$  и выбранная траектория перехода проектируемой системы в эту точку являются результатами выполнения некоторой совокупности целей  $\{Z_i(t)\}_{gz}$ .

Рассмотрим при фиксированном  $t$  совокупности целей  $\{Z_i(t)\}_{gz}$  и  $\{Z_i(t)\}$ , входящие в состав (4) и (5) и имеющие результатами точки  $b, a$  и/или  $Y_a, Y_z$  соответственно. Используя известные методики структуризации целей и формализуя полученные цели с помощью аппарата  $E_z$ , представим  $\{Z_i\}_{gz}$  и  $\{Z_i\}$  в виде совокупности элементарных целей  $\{Z_i\}_{gz}^E$  и  $\{Z_i\}^E$ , упорядоченных по очередности реализации  $E_z$ .

Исходя из опыта проектирования сложных систем, можно утверждать, что результаты целей проектирования в общем случае обладают весьма большой чувствительностью к возмущению координат  $m_1 - m_3, m_5$ . Напротив, координата  $m_4$  («как сделать»), как правило, может быть значительно изменена без возникновения изменения результатов запланированных целей, т.к. известно, что при реализации целей лицо, принимающее решения, вынуждено адаптировать способы их достижения к особенностям текущей ситуации.

В связи с вышеизложенным, изменение результата целей, вызванное возмущением характеристик  $m_1 - m_3, m_5$  следует считать недопустимым, а его возникновение должно служить основанием для коррекции реализуемых целей.

Зафиксируем значения координат  $m_1 - m_3, m_5$  и определим, какие изменения координаты  $m_4$  («как сделать») не приведут к динамике целей. Воспользуемся методикой, основанной на идеях подхода, примененного Д.А. Поспеловым при синтезе  $\alpha$  - эталона для обобщения и классификации ситуаций.

Из анализа условий (4), (5) и правила построения графовых моделей следует, что нулевое смещение, обусловленное изменением только группы характеристик  $m_4$ , будет достигнуто при выполнении:

$$G^*(U^*, E^*, Q^*) R G(U, E, Q) \quad (6)$$

( $G^*(U^*, E^*, Q^*)$  и  $G(U, E, Q)$ ) - графовые модели двух последовательностей элементарных целей  $\{Z_i\}^E$  и  $\{Z_i\}_{gz}^E$ .

Для определения степени совпадения  $G^*$  и  $G$  возможно использовать один из известных методы количественного анализа сходства графов, например, метод, основанный на применении топологических индексов графов, подграфовых метрик, фрагментов графов и метрик на числовых последовательностях и другие.

Выше отмечалось, что несущественные изменения способа реализации целей проектирования (управляющая координата  $m_4$ ), адаптирующие процесс достижения целей к особенностям текущей ситуации, не вызывает динамики результата целенаправленной деятельности. В отношении графовых моделей  $G$ , характеризующих способ достижения целей, это проявится в виде изменений периферийных вершин графов, их дуг и весов дуг, что приведет к изменению  $\rho_S$  на интервале  $[\varepsilon, 1]$ . Тогда (6) будет выполнено, если для каждой цели последовательностей  $\{Z_i\}_{gz}^E$  и  $\{Z_i\}^E$  справедливо:

$$\rho_S(G^*, G) \leq \varepsilon$$

( $G$  и  $G^*$  - графовые модели целей последовательностей  $\{Z_i\}_{gz}^E$  и  $\{Z_i\}^E$  при неизменном и изменившемся значении  $m_4$  соответственно;  $\varepsilon$ - величина, характеризующая предельно допустимое расхождение  $G$  и  $G^*$ , не приводящее к изменению запланированных результатов). Данное утверждение положено в основу разработанного ниже алгоритма решения задачи.

#### 4. Алгоритм решения

Приведем схему работы алгоритма решения поставленной задачи.

Шаг 1. Определяется основная цель проектирования  $gz(t)$  и осуществляется ее структуризация на совокупность более простых целей  $\{Z_i(t)\}_g$ .

Шаг 2. Цели  $\{Z_i(t)\}_{gz}$  формализуются с помощью аппарата  $E_z$  и совокупностей  $E_z$ . В результате формируются последовательность элементарных целей  $\{Z_i\}_{gz}^E$ , реализующих  $gz(t)$ , и их графовые модели.

Шаг 3. Устанавливается периодичность решения задачи на  $[t_H, t_k]$ . Задача решается при изменениях управляющих параметров любой из цели последовательности  $\{Z_i\}_{gz}^E$ .

Шаг 4. В момент решения задачи  $t_p > t_H$  происходит поэлементное сравнение последовательностей  $\{Z_i\}_{gz}^E$  и  $\{Z_i(t_p)\}_{gz}^E$ , имеющих мощность  $K$ .

Шаг 5. Произошли изменения характеристик группы  $m_1$ ? При наличии изменений – переход к следующему шагу, при их отсутствии - переход к шагу 7.

Шаг 6. Лицо, принимающее решения, информируется о возможном изменении запланированного результата  $k$ -той цели из последовательности  $\{Z_i(t_H)\}_{gz}^E$  по причине изменения формулировки цели.

Шаг 7. Произошли изменения характеристик группы  $m_2$ ? При наличии изменений – переход к следующему шагу, при их отсутствии - переход к шагу 9.

Шаг 8. Лицо, принимающее решения, информируется о возможном изменении запланированного результата  $k$ -той цели из-за изменения характеристик объекта целенаправленной деятельности.

Шаг 9. Произошли изменения характеристик группы  $m_3$   $k$ -той цели? При наличии изменений – переход к следующему шагу, при их отсутствии - переход к шагу 11.

Шаг 10. Лицо, принимающее решения, информируется о возможном изменении запланированного результата по причине изменения временных характеристик цели.

Шаг 11. Произошло ли изменения графовой модели  $k$ -той цели? При наличии изменений – переход к следующему шагу, при их отсутствии - переход к следующей цели.

Шаг 12. По зависимостям (7) и (8) рассчитывается величина  $\rho_S$  и проверяется выполнение условия  $\rho_S(G^*, G) \leq \varepsilon$ . При его выполнении осуществляется переход к следующему шагу, при невыполнении – рассматривается следующая цель.

Шаг 13. Лицо, принимающее решения, информируется о возможном изменении запланированного результата по причине изменения способа реализации  $k$ -той цели.

Работа алгоритма заканчивается после просмотра всех целей последовательностей  $\{Z_i(t_H)\}_{gz}^E$  и  $\{Z_i(t_p)\}_{gz}^E$

## 5. Пример

Рассмотрим процедуру решения задачи на примере функционирования интеллектуальной системы автоматизированного проектирования и управления. При управлении проектом по созданию участка автоматизированных станочных модулей для изготовления подшипников была поставлена цель  $Z_1$  со следующей формулировкой: «Обеспечить эксплуатационную надежность оборудования проектируемого участка в сложившихся производственных условиях». Значения управляющих координат процесса достижения  $Z_1$  приведены в таблице, графовая модель цели, характеризующая выбранный способ ее достижения, представлена на Рис. 2.

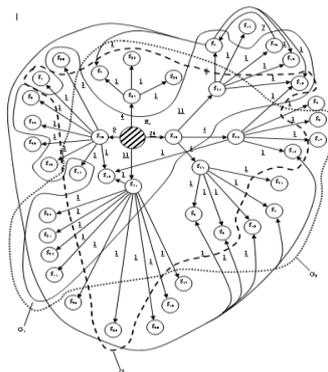


Рис. 2. Графовая модель цели  $Z_1$

$S_1$ - нахождение размера в пределах допуска;  $S_2$ - частота проведения контрольно-измерительных операций;  $S_3$ - геометрия и износ элементов станочной системы;  $S_4$ - технологические режимы;  $S_5$ - износ элементов станочной системы;  $S_6$ - погрешности базирования заготовок;  $S_7$ - температурные возмущения;  $S_8$ - упругие деформации;  $S_9$ - технологическая последовательность операций;  $S_{10}$ - производительность обработки;  $S_{11}$ - квалификация и заинтересованность обслуживающего персонала;  $S_{12}$ - количество модулей, обслуживаемых одним оператором;  $S_{13}$ - эргономические показатели оборудования;  $S_{14}$ - степень использования систем автоматического регулирования;  $S_{15}$ - достоверность поступающей диагностирующей информации;  $S_{16}$ - организация контроля и диагностирования;  $S_{17}$ - выбор системы измерительных средств и контроля обрабатываемой поверхности;  $S_{18}$ - организация материально-технического обеспечения производства;  $S_{19}$ - качество поступающих заготовок;  $S_{20}$ - качество программного обеспечения;  $S_{21}$ - качество наладки станочных модулей;  $S_{22}$ - соблюдение персоналом требований по технологии и обработке изделий;  $S_{23}$ - соблюдение требований по монтажу оборудования;  $S_{24}$ - сменность работы оборудования;  $S_{25}$ - причины отказов оборудования и их влияние на объем и продолжительность работ по техническому обслуживанию станочных модулей;  $S_{26}$ - продолжительность ремонтных работ;  $S_{27}$ - параметры окружающей среды;  $S_{28}$ - микроклимат помещения;  $S_{29}$ - запыленность помещения;  $S_{30}$ - основные характеристики оборудования;  $S_{31}$ - квалификация обслуживающего персонала;  $S_{32}$ - технические характеристики станочного оборудования;  $S_{33}$ - качество проведения ремонтных работ;  $S_{34}$ - характеристики контрольно-измерительной аппаратуры;  $S_{35}$ - конструктивные особенности используемого оборудования;  $S_{36}$ - продолжительность ремонтных работ;  $S_{37}$ - периодичность переподготовки персонала;  $S_{38}$ - марка стали;  $S_{39}$ - изготовитель стали;  $S_{40}$ - качество обработки поверхности;  $S_{41}$ - стоимость оборудования;  $S_{42}$ - графовые модели  $G_1 - G_5$ , соответственно:  $G_4 = G_2 \cup G_3, G_5 = G_1 \cup G_2$ .

Таблица 1. Значения управляющих координат цели проектирования

Координата $m_1$ «Что делать»	Координата $m_2$ «Когда делать»	Координата $m_3$ «Где делать»	Координата $m_4$ «Как сделать»	Координата $m_5$ «Последовательность реализации целей»
Обеспечить эксплуатационную надежность проектируемого участка автоматизированных станочных модулей	Начиная с момента запуска проектируемого участка в эксплуатацию	Предприятие: XX Корпус: XX Цех: XX Участок: № XX В осях: XX	См. Графовую модель цели (Рис. 2)	Для одной цели не определяется

На этапе реализации цели  $Z_1$  возникли непредвиденные обстоятельства, обусловленные: отсутствием устойчивого платежеспособного спроса на выпускаемую номенклатуру подшипников;

нестабильным финансовым положением предприятия;  
перебоями с поставками комплектующего оборудования.

В результате, выбранный способ достижения  $Z_1$  был пересмотрен, а значения характеристик целей проектирования  $m_1 - m_3, m_5$  оставлены без изменения. На рассмотрение руководителя проекта было представлено пять альтернативных способов достижения  $Z_1$  (Рис. 2) и возникла необходимость выбрать те из них, реализация которых не приведет к отклонению от запланированных результатов.

Определим степень совпадения графа  $G$  с каждой из графовых моделей  $G_1 - G_5$ , воспользовавшись функционалом  $\rho_S(G^*, G) = \rho_S(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3)$ , определенном, в соответствии с [9], из выражения:

$$\rho_S(G^*, G) = \sum_{i=1}^3 \mu_i \Delta_i(G^*, G); \mu_i \geq 0; i = 1, 3; \sum_{i=1}^3 \mu_i = 1;$$

$$\Delta_1(U^*, U) = \frac{|U^* \cap U|}{|U^* \cup U|}; |U^* \cap U| \neq 0; \Delta_2(E^*, E) = \frac{|E^* \cap E|}{|E^* \cup E|}; |E^* \cap E| \neq 0;$$

$$\Delta_3(Q^*, Q) = \frac{|Q^* \cap Q|}{|Q^* \cup Q|}; |Q^* \cap Q| \neq 0;$$

( $||$ - символ, обозначающий мощность множеств;  $\mu_i$ - определяемые экспертом весовые коэффициенты).

В данном случае зависимости  $\Delta_1(U^*, U)$ ,  $\Delta_2(E^*, E)$  и  $\Delta_3(Q^*, Q)$  имеют ясный физический смысл и трактуются как индикаторы, характеризующие степень совпадения множеств вершин, дуг и весов дуг графов  $G^*$  и  $G$  соответственно, измеряемые в распространенной и информативной шкале отношений  $[0, 1]$ .

Величина  $\varepsilon$  для данной модели цели равна 0,75,  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \frac{1}{3}$ . Имеем:

$$\Delta_1 = \frac{18}{41} \approx 0.439; \quad \Delta_2 = \frac{28}{53} \approx 0.528; \quad \Delta_3 = \frac{28}{53} \approx 0.528;$$

$$\rho_5(G, G_1) = \left( \frac{1}{3} \cdot 0.439 + \frac{1}{3} \cdot 0.528 + \frac{1}{3} \cdot 0.528 \right) = 0.498;$$

$$\Delta_1 = \frac{25}{41} \approx 0.610; \quad \Delta_2 = \frac{31}{53} \approx 0.585; \quad \Delta_3 = \frac{31}{53} \approx 0.585;$$

$$\rho_5(G, G_2) = \left( \frac{1}{3} \cdot 0.610 + \frac{1}{3} \cdot 0.585 + \frac{1}{3} \cdot 0.585 \right) = 0.593;$$

$$\Delta_1 = \frac{19}{41} \approx 0.463; \quad \Delta_2 = \frac{18}{53} \approx 0.340; \quad \Delta_3 = \frac{18}{53} \approx 0.340;$$

$$\rho_5(G, G_3) = \left( \frac{1}{3} \cdot 0.463 + \frac{1}{3} \cdot 0.340 + \frac{1}{3} \cdot 0.340 \right) = 0.380;$$

$$\Delta_1 = \frac{29}{41} \approx 0.707; \quad \Delta_2 = \frac{30}{53} \approx 0.566; \quad \Delta_3 = \frac{30}{53} \approx 0.566;$$

$$\rho_5(G, G_4) = \left( \frac{1}{3} \cdot 0.707 + \frac{1}{3} \cdot 0.566 + \frac{1}{3} \cdot 0.566 \right) = 0.613;$$

$$\Delta_1 = \frac{33}{41} \approx 0.805; \quad \Delta_2 = \frac{40}{53} \approx 0.755; \quad \Delta_3 = \frac{40}{53} \approx 0.755;$$

$$\rho_5(G, G_5) = \left( \frac{1}{3} \cdot 0.805 + \frac{1}{3} \cdot 0.755 + \frac{1}{3} \cdot 0.755 \right) = 0.771;$$

Проведенные расчеты показывают, что в качестве альтернативы первоначальному способу достижения  $Z_1$  можно рассматривать только четвертый и пятый способ достижения этой цели. Применения трех остальных альтернативных способов может привести к результатам, отличающимся от ожидаемых.

## 6. Заключение

Решение разработанной постановки задачи позволяет определить величину возмущений  $\{m_i\}_1^5$ , не приводящих к изменению запланированных результатов целей проектирования. Предложенный подход может быть использован при разработке математического обеспечения автоматизированных систем управления сложными проектами.

## Литература

1. Руднев В.Е., Володин В.В., Лучанский К.М. и др. Формирование технических объектов на основе системного анализа. – М.: Машиностроение, 1991. – 162 с.
2. Винер Н. Кибернетика – М.: Сов.радио, 1958. – 344 с.
3. Петров А.И., Стецко Г.О. Синтез самоорганизующихся стохастических систем, приспособляющихся к изменениям цели управления // Известия Академии Наук. Теория и системы управления. 1996. N 4. – С. 47–53.
4. Соломенцев Ю.М., Исайченко В.А., Плыскалин В.Я. и др. Под общ. ред. Соломенцева Ю.М. Системное проектирование интегрированных АСУ ГПС машиностроения – М.: Машиностроение, 1988. – 487 с.
5. Кульба В.В., Миронов П.Б., Назаренко В.М. Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых орграфов // А и Т. 1993. N 7. – С. 130–137.
6. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. – М.: Наука, 1993. – 157 с.
7. Представление знаний в человеко-машинных и робототехнических системах. Т.А. Фундаментальные исследования в области представления знаний. – М.: ВИНТИ, 1984
8. R.L. Keeney, H. Raiffa. Decisions with multiple objectives–preferences and value tradeoffs – Cambridge University Press, Cambridge & New York, 1993. – 569 p.
9. Burkov V., Shchepkin A., Irikov V., Kondratiev V. Methodology and technology of control systems development // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. – P. 15–27.
10. Kushnikov V.A., Rezchikov A.F., Tsvirkun A.D. Control in man-computer systems with computer-aided goal correction // Automation and Remote Control. 1998. T.59.№7.Part 2 – P. 1040–1046.
11. Kushnikov V.A., Rezchikov A.F., Tsvirkun A.D. Control in man-machine systems with automated correction of objectives // Meitan Kexun Jishu. 1998. T.26. №11.– P. 168–175.
12. Germeier J. B. Einführung in die Theorie der Operationsforschung / Herausgegeben von Horst Hollatz – Berlin: Akademie-Verlag, 1974. – 302 с.
13. О. В. Крюков, Н. И. Сычев, М. Н. Сычев и др.; под редакцией О. В. Крюкова. Диагностика и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики. – Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. — 184 с.
14. Pupkov K.A., Brovarskaya Y.K. Dynamic and information properties of intelligent control systems // Procedia Computer Science. "14th International Symposium "Intelligent Systems"" – М.: INTELS 2020,2021 – P. 489–494.