

УДК 658.5.011.56:359

П.В. Попов

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Попов Павел Валерьевич**, докторант Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова», кандидат военных наук. Окончил Калининградское Высшее военно-морское училище и Военно-морскую академию им. Н.Г. Кузнецова. Область научных интересов – радиоэлектронная защита, моделирование и оценка эффективности систем связи ВМФ. Имеет более 40 публикаций по проблемам данной научной области. [e-mail: spbppv@mail.ru].

### Аннотация

В статье изложен новый научный метод, целью которого является обеспечение эффективного функционирования элементов сложных организационно-технических систем (ЭСОТС), имеющих свою математическую интерпретацию (модель).

Предложенный метод обеспечивает адаптацию ЭСОТС к складывающимся условиям на различных этапах функционирования за счет достижения критериально заданного качественного состояния посредством реализации рациональной совокупности воздействий, определяемых на основе известных методов поисковой оптимизации.

Ключевые слова: управление, элементы сложных организационно-технических систем, функция эффективности, показатель эффективности, критериальные значения, точка соответствия, оптимизация, управляющие воздействия, управляемые параметры, факторы риска.

### Abstract

The article gives a new science method whose aim is to ensure effective operation of elements of sophisticated organizational and technical systems which have their mathematical interpretation (model). The given method ensures an adaptation of elements of sophisticated organizational and technical systems to developing conditions at different stages of operation due to achieved quality state given by criteria by means of implementation of rational aggregate of actions defined on basis of known methods of search optimization.

Key words: control, elements of sophisticated organizational and technical systems, effectiveness function, effectiveness index, criterion values, compliance point, optimization, control actions, controlled parameters, risk factors.

Оценка и, при необходимости, повышение эффективности выполнения функций, возложенных на элементы сложных организационно-технических систем, требуют определения некоторых показателей, характеризующих качество функционирования данных ЭСОТС в определенных условиях [1, 2]. В то же время, при определении путей улучшения того или иного показателя эффективности (ПЭ) ЭСОТС возникает задача нахождения рациональной совокупности управляющих воздействий на эти элементы. Цель данных воздействий – достижение критериально заданного значения ПЭ ЭСОТС за минимальный временной промежуток с условием оптимального расходования имеющегося ресурса.

Для большого количества математических моделей, описывающих процесс функционирования различных по назначению ЭСОТС, как главный (обобщенный) ПЭ, так и некоторая совокупность частных ПЭ представляют собой среднее значение некоторой величины, или вероятность того, что данная случайная величина будет меньше или больше заданного значения. Так, рассматривая в качестве примера выбор показателей эффективности для радиолинии системы связи ВМФ, используем аналогичный подход. Придавая указанной случайной величине физический смысл времени передачи сообщения, для анали-

за качества функционирования радиолинии используем функцию распределения этого времени  $Q(t)$ , а для непосредственной количественной оценки – среднее время передачи сообщения  $t_{nc}$  и вероятность передачи сообщения за время, не более заданного  $P(t_{nc} \leq T_{зад})$ , определяемую как значение  $Q(t)$  в точке  $T_{зад}$ . Вычисление данных ПЭ и их последующее критериальное оценивание представляют собой *первый этап задачи синтеза управляющих воздействий на ЭСОТС*.

С учетом того, что функция  $Q(t)$  монотонно возрастает при аргументе (текущем времени)  $t \rightarrow \infty$ , при совместном наложении требуемого ( $P_{треб}$ ) и заданного ( $T_{зад}$ ) критериальных (граничных) условий на значения функции и аргумента, соответственно, можно определить некую точку соответствия.

Очевидно, что для описываемого функцией  $Q(t)$  процесса эта априорно заданная точка соответствия в пространстве случайных величин  $t$  и  $P$  не просто характеризуется их заданными значениями, но и определяет минимально удовлетворяющий требуемому качеству уровень реализации целевого процесса.

С одной стороны, справедливо утверждать, что с точки зрения качества процесса (в данном случае – связи) и рассмотрения его в практической плоскости, нахождение

ЭСОТС в точке соответствия крайне затруднительно, а в подавляющем большинстве случаев – невозможно. Поэтому, с той же практической точки зрения, точка соответствия обязательно должна изначально содержать в себе определенную положительную степень избыточности как по значению  $t - E_t$ , так и по значению  $P - E_p$ , т. е. должны выполняться условия, при которых избыточные критериальные значения функции и аргумента относительно исходных будут соответственно равны:

$$P^*_{\text{треб}} = P_{\text{треб}} + E_p \quad (1)$$

$$T^*_{\text{зад}} = T_{\text{зад}} + E_t \quad (2)$$

Степени избыточности  $E_t$  и  $E_p$  должны оцениваться и задаваться экспертно органом управления системой.

В целом, в рамках структуры предлагаемого метода определение точки соответствия для решения задачи синтеза управляющих воздействий на исследуемый ЭСОТС имеет основополагающее значение.

Вследствие указанных обстоятельств, а также, учитывая, что  $Q(t)$  является в общем случае функцией многих переменных  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ );  $x_i \in X$ , характеризующих совокупность внешних и внутренних условий функционирования исследуемого ЭСОТС, представляется необходимым привести задачу отыскания оптимальной совокупности управляющих воздействий (обозначим ее через  $A$ ) на ЭСОТС. Данная задача может быть решена посредством определения функций приращений функции  $Q(t)$ , характеризующей распределение времени реализации целевого процесса ЭСОТС (для выбранной в качестве примера радиолинии системы связи ВМФ – времени передачи сообщения), с учетом изменений значений влияющих на  $Q(t)$  параметров.

Как уже было отмечено, на время реализации целевого процесса ЭСОТС и, следовательно, на характер изменения  $Q(t)$  оказывает влияние некое множество параметров  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), каждый из которых может изменяться в определенных (заданных либо прогнозируемых) интервалах между начальным  $x_{in}$  и конечным  $x_{ik}$  значениями, т. е.  $\Delta x_i = x_{ik} - x_{in}$ . По сути, в рамках математической модели исследуемого ЭСОТС совокупностью всех значений  $\Delta x_i$  определяется имеющийся у него ресурс, использование которого осуществляется через соответствующие управляющие воздействия. Кроме того, некоторые из параметров  $x_i \in X$  также являются функциями многих переменных  $w_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ),  $w_j \in W$ , характеризующих совокупность внешних и внутренних условий функционирования ЭСОТС.

Данная многослойность параметров и функций определяется многоуровневостью построения комплексной модели ЭСОТС (в рассматриваемом примере – радиолинии системы связи ВМФ). Учет такой многослойности в контексте математической модели исследуемого ЭСОТС и решаемой с помощью предлагаемого метода задачи синтеза управляющих воздействий определяет необходимость детализации математической записи итогового функционала ЭСОТС до параметров «нижнего уровня».

Для упрощения дальнейших рассуждений, не в ущерб строгости решаемой задачи синтеза, в дальнейшем будем

полагать, что все  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ),  $x_i \in X$  определены и не являются функциями. Однако заметим, что излагаемый ниже порядок справедлив для каждого уровня детализации.

На *втором этапе задачи синтеза управляющих воздействий на ЭСОТС* для выполнения объективных требований по рациональному подходу и снижению размерности при ее решении (в плане сокращения объема и времени вычислений посредством оптимизации математических процедур) необходимо выполнить два условия:

- производить необходимые расчеты только при заданных значениях времени передачи сообщения –  $T^*_{\text{зад}}$  (одном либо нескольких);

- интервал  $\Delta x_i$  должен удовлетворять единому и априорно установленному критериальному требованию, накладываемому на степень отклика  $S_{Q(t)}(\%)$  исследуемой функции эффективности  $Q(t)$  по каждому  $i$ -му параметру, т. е. должно выполняться условие, при котором:

$$S_{Q(t)_{x_i}}(\%) = \left( \frac{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{ik})}{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{in})} \right)_{(\%)} \geq S_{Q(t)_{mp}}(\%) \quad (3)$$

Причем, если отношение, указанное в скобках в левой части неравенства (1) и вычисленное в размах, окажется больше единицы, тогда:

$$\begin{aligned} S_{Q(t)_{x_i}}(\%) &= \left( \frac{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{ik})}{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{in})} \right)_{(\%)} = \\ &= \left( \frac{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{ik}) \cdot 100\%}{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{in})} \right) - 100\% \end{aligned} \quad (4)$$

а если меньше единицы:

$$\begin{aligned} S_{Q(t)_{x_i}}(\%) &= \left( \frac{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{ik})}{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{in})} \right)_{(\%)} = \\ &= \left( 1 - \frac{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{ik})}{Q(T^*_{\text{зад}}, x_{in})} \right) \cdot 100\% \end{aligned} \quad (5)$$

Те параметры, для которых условие (3) выполняется не будет,  $x_z$  ( $x_z \in X$ ;  $z < n$ ) должны быть исключены из совокупности управляющих воздействий  $A$  и не рассматриваться в дальнейших исследованиях. Оставшаяся совокупность будет представлять собой набор параметров  $x_y$  ( $x_y \in X$ ;  $y < n$ ;  $n = y + z$ ), изменение значений которых в пределах определенных для каждого из них интервалов способно в той или иной степени повысить качество функционирования системы.

С учетом особенностей функции  $Q(t)$ , в качестве процедуры определения рациональной совокупности управляющих воздействий  $A$  может быть предложена задача определения функций приращений функции эффективности по параметрам  $x_y$ :

$$A = \Delta Q(t)_{x_y} \quad (6)$$

Данная процедура является *третьим этапом задачи синтеза управляющих воздействий на ЭСОТС* и относится к разряду задач поисковой оптимизации, которые могут быть решены градиентными методами и их модифика-

циями: методом Ньютона, методами переменной метрики, покоординатного спуска, случайного поиска и другими [3–7]. В зависимости от глубины разработки этих методов они имеют существенные различия по качеству оптимизации, скорости сходимости, а также по объему и сложности вычислительных процедур. С учетом способа определения и требований к интервалам  $\Delta x_i$  для нахождения совокупности  $A$  может быть предложен модифицированный метод градиентного спуска.

Для определения  $\Delta Q(t)_{x_y}$  применим следующий подход. Так как каждый из параметров  $x_y$  может изменяться в некоторых пределах  $\Delta x_y$ , это влечет за собой и изменение  $Q(t)$ . Учитывая, что  $Q(t)$  является непрерывной функцией по каждому из параметров  $x_y$ , справедливо равенство:

$$\Delta Q(t)_{x_y} = \frac{\partial Q(t)}{\partial x_y} \cdot \Delta x_y. \quad (7)$$

Результатом последовательного определения произведений частных производных по каждому из выбранных направлений (параметрам  $x_y$ ), как компонентов градиента функции  $Q(t)$ , на соответствующие приращения выбранных параметров будет являться семейство функций приращений целевой функции  $Q(t)$ .

Далее необходимо подставить вместо  $t$  в (7) одно или несколько (в зависимости от исходных условий анализа ЭСОТС) критериальных значений  $T^*_{зад}$ , что позволит получить дискретную (одну или несколько) функций приращений в виде дискретных отсчетов значений  $\Delta Q(T^*_{зад})_{x_y}$ .

Ранжируя данные параметры по выбранному критерию уменьшения прироста эффективности, т. е. полученных значений  $\Delta Q(T^*_{зад})_{x_y}$ , можно получить искомую упорядоченную последовательность управляющих воздействий  $A$  на ЭСОТС в заданных условиях функционирования:

$$A = f(\Delta Q(T^*_{зад}, Y)), \quad (8)$$

где  $Y$  – пространство параметров  $x_y$ .

Следует отметить, что получение совокупности  $A$  на временных срезах, соответствующих значениям  $T^*_{зад}$  определяется двумя важными, с точки зрения управления ЭСОТС и реализуемого им процесса, обстоятельствами. Во-первых, таким образом определяется прогнозируемая для этих критериальных временных срезов совокупность дискретных значений приращений целевой функции  $Q(t)$  по всем критичным для нее параметрам. Во-вторых, учитывается тот факт, что для различных значений  $T^*_{зад}$  получаемый ранжированный ряд параметров пространства  $Y$ , а значит и последовательность управляющих воздействий  $A$  будут разными.

Таким образом, для выполнения условия максимального сохранения имеющегося ресурса возможного изменения управляющих воздействий посредством рационального его использования из полученной упорядоченной последовательности, сверху вниз, выбирается такая совокупность параметров, изменение значений которых позволит приблизить, достичь или превысить требуемое значение ПЭ функционирования управляемого ЭСОТС.

Четвертым (завершающим) этапом задачи синтеза управляющих воздействий на ЭСОТС будет являться опре-

деление в той же самой последовательности фактических значений параметров  $x_y$ , ориентированных на достижение точки соответствия.

Цель данного этапа в общем смысле та же, что и у предыдущего, – выполнение условия максимального сохранения имеющегося у ЭСОТС защитного ресурса посредством рационального его использования, но только за счет оптимизации значений необходимого и достаточного количества наиболее критичных параметров из полученной на предыдущем этапе исследования совокупности  $A$ .

Содержание такой процедуры заключается в последовательном решении ряда обратных задач. Сутью каждой в отдельности из совокупности таких задач является отыскание тех необходимых значений критичных для системы параметров, при которых она достигает требуемого уровня качества функционирования.

Решение данных задач производится при фиксированных значениях всех исходных данных, определяющих некие начальные условия исследования и используемых для определения функции  $Q(t)$ , и главных показателей функционирования рассматриваемой системы связи, принимающих свои критериальные значения:  $t_{nc} = T^*_{зад}$ ;  $P(t_{nc} \leq T^*_{зад}) = P^*_{треб}$ .

В общем случае, выражение для обратной задачи, решаемой относительно отдельно выбранного  $k$ -го критичного параметра из пространства параметров  $Y$ , можно записать в следующем виде:

$$xk_y = F(x_i (k = \overline{1, y}), x_i \in X; T^*_{зад}; P^*_{треб}), \quad (9)$$

где  $xk_y \in X; k = \overline{1, y}$ .

Если для достижения требуемого уровня качества функционирования ЭСОТС, определяемого точкой соответствия, достаточно изменения до необходимого значения одного самого критичного параметра, то задача синтеза управляющих воздействий на ЭСОТС считается решенной. В противном случае, необходимо перейти к следующему по шкале критичности параметру и с учетом измененного значения предыдущего повторить процедуру в соответствии с (10) и т. д.

$$x(k+1)_y = F(x_i (i = \overline{1, n}), x_i \in X; xk_y; T^*_{зад}; P^*_{треб}). \quad (10)$$

В том случае, если последующий по шкале параметр находится в противоречивой взаимосвязи с предыдущим, необходимо, не рассматривая данный параметр, перейти к следующему за ним.

Важно отметить, что при решении задачи синтеза управляющих воздействий на ЭСОТС с использованием предлагаемого метода необходимо учитывать фактор риска в вопросе соблюдения требований по влиянию критичных для ЭСОТС параметров на его важные свойства и характеристики. Так, например, для радиолинии системы связи ВМФ, функционирующей в условиях сложной радиоэлектронной обстановки, изменение значений критичных для нее параметров для оказания управляющих воздействий должно учитывать такие ее важнейшие характеристики, как боевая готовность, устойчивость, электромагнитная доступность, разведзащищенность, пропускная способность, управляемость и т. д. В любом случае, какой бы ни

была сложность имеющихся у ЭСОТС внешних и внутренних взаимосвязей, степень полноты их учета в значительной мере будет определять эффективность и качество ее функционирования.

С учетом данного обстоятельства, рассмотренный выше четвертый этап задачи синтеза управляющих воздействий, связанный с решением обратных задач, должен либо на экспертном уровне, т. е. по решению органа управления ЭСОТС (должностного лица), либо на поддерживающем принятии решения уровне (например, посредством использования программно-технического комплекса (ПТК) АСУ процессами, реализуемыми ЭСОТС) учитывать указанный выше фактор риска с последующим выбором способа решения обратных задач, а именно, последовательного или параллельно-последовательного.

Последовательный способ решения был достаточно подробно рассмотрен выше и может быть применим:

1) когда фактором риска априори пренебрегают, руководствуясь принципом «главное – результат любой ценой»;

2) когда либо экспертно, либо программно (на поддерживающем принятии решения уровне) риск оценивается как незначительный или отсутствует вообще при достаточно благоприятных внешних и внутренних условиях функционирования ЭСОТС.

Параллельно-последовательный способ решения применяется тогда, когда фактор риска обязательно учитывается и играет существенную роль в выборе тех или иных управляющих воздействий на ЭСОТС, если, конечно, такая возможность выбора существует.

Суть данного способа заключается в следующем. Вначале на его параллельном этапе одновременно решаются обратные задачи для всех критичных для ЭСОТС параметров по определению их необходимых значений, при которых данный элемент достигает требуемого уровня качества функционирования. Далее органом управления ЭСОТС (должностным лицом) либо посредством соответствующего ПТК анализируются полученные значения тех параметров, изменение которых может быть при определенной степени нежелательно либо опасно для важнейших характеристик ЭСОТС и системы в целом.

В зависимости от результатов анализа возможны три варианта действий:

1. Данные параметры остаются в совокупности управляющих воздействий  $A$ . При этом полученные их значения не выходят за рамки априори определенных, условно номинальных (предельных), превышать которые запрещено.

2. Данные параметры также остаются в совокупности  $A$ , но при этом полученные их значения незначительно (в относительном рассмотрении) выходят за рамки условно номинальных. Последние вполне логичным образом ограничивают предел изменений данных параметров, оставшихся в обойме защитного ресурса системы.

3. Данные параметры исключаются из полученной ранжированной совокупности управляющих воздействий  $A$ . При этом полученные их значения значительно (в относительном рассмотрении) выходят за рамки условно номинальных.

Далее на последовательном этапе работает процедура одноименного способа, когда поочередно в соответствии с имеющимся ранжированным рядом параметров решается задача фактического достижения ЭСОТС требуемого уровня качества функционирования.

Таким образом, предложенный в данной статье подход к решению задачи синтеза управляющих воздействий на ЭСОТС представляет собой новый научный метод управления этими элементами. Данный метод направлен на определение оптимальных значений, а также необходимого и достаточного количества критичных параметров ЭСОТС с учетом их весов, а также фактора риска в вопросе соблюдения требований по их влиянию на важные свойства и характеристики ЭСОТС.

Метод обеспечивает возможность реализации схожих по замыслу задач синтеза управляющих воздействий на различные по предназначению ЭСОТС и позволяет адаптировать их к складывающимся условиям на разных этапах функционирования за счет приближения к заданному качественному состоянию посредством реализации выбранной совокупности воздействий.

Данный метод по своей сути объединяет в себе и комплексно решает две важнейшие задачи:

1. Расчет и оценка ПЭ функционирования ЭСОТС в неких начальных (исходных) условиях.

2. Выработка и определение рациональных управляющих воздействий на ЭСОТС, если таковые необходимы.

В целом, основными достоинствами метода являются:

1. Универсальность метода и, как следствие, широкая область его применения для ЭСОТС, ориентированных, с точки зрения управления, на достижение критериально заданного качественного состояния и имеющих свою математическую интерпретацию (модель). При этом наилучший результат от использования данного метода можно ожидать тогда, когда ЭСОТС и модель работают максимально схоже и синхронно друг с другом, в идеале – в реальном масштабе времени модель отображает ЭСОТС.

2. Метод исключает хаотичность и непоследовательность в вопросах управления ЭСОТС, а также производство большого количества итераций, характеризующихся реализацией значительного вычислительного объема и, как следствие, чрезмерным расходом временного ресурса.

3. Метод позволяет подходить к вопросам управления ЭСОТС исключительно конкретно, рационально и оптимально, при этом минимизируя возможные риски. Иными словами, метод дает управленцу ответы на ряд важнейших вопросов: «Как, с точки зрения достигаемого результата и критериев оценки, работает ЭСОТС? Какие параметры в наибольшей степени определяют его эффективность? В какой последовательности значения какого необходимого и достаточного количества и каких именно параметров, до каких их пределов необходимо изменить для достижения ЭСОТС требуемого уровня качества функционирования?»

4. При рассмотрении процесса, реализуемого ЭСОТС в течение некоторого заданного периода функционирования, метод позволяет синтезировать динамические (ситуационные) алгоритмы управления, что, несомненно, расширяет его возможности.

Наиболее эффективным путем практического использования предложенного метода может считаться его детальная алгоритмизация и программная реализация для решения тех или иных прикладных задач синтеза управляющих воздействий на различные по назначению ЭСОТС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Житов Ю.И., Свиченский К.С. Методология исследования эффективности систем связи ВМФ. – СПб.: ВМА, в/ч 60130, 1997.
2. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи / В.Н. Волкова [и др.]. – М.: Радио и связь, 1983.
3. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1982.
4. Батищев Д.И. Поисковые методы оптимального проектирования. – М.: Сов. Радио, 1975.
5. Габасов Р., Кирилова Ф.М. Методы оптимизации. – Минск: БГУ, 1975.
6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация : [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1985.
7. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. – М.: МИКАП, 1994.