

14. Воевода А. А., Бобобеков К. М. Автономность и астатизм в многоканальной системе с двухпараметрическим регулятором // Сб. науч. тр. НГТУ. 2017. № 3 (89). С. 7–31.

15. Deep Q-learning from demonstrations. Available / T. Hester, M. Vecerik, O. Pietquin, M. Lanctot, T. Schaul, B. Piot, D. Horgan, J. Quan, A. Sendonaris, G. Dulac-

Arnold, I. Osband, J. Agapiou, J. Z. Leibo, A. Gruslys // URL: <https://arxiv.org/abs/1704.03732> (дата обращения 27.05.2020).

16. Бобобеков К. М., Воевода А. А. Расчет параметров регулятора для стабилизации перевернутого маятника по углу отклонения // Сб. науч. тр. НГТУ. 2016. № 3 (85). С. 18–32.

A. A. Voevoda, D. O. Romannikov
Novosibirsk State Technical University

SYNTHESIS METHOD OF REGULATORS USING NEURAL NETWORKS FOR NONLINEAR OBJECTS

The main options for using neural networks to solve the problems of synthesis of automatic control systems are: using them to adjust the values of controller coefficients; the use of a neural controller, in which its training is carried out in various ways, in particular, according to pre-calculated data (errors and known control) or by optimization in order to minimize the error of the output signal of the object. A method for synthesizing a neural controller for non-linear objects based on the structure of a previously calculated controller for a linearized model of an object is proposed. The main steps of the proposed method are: synthesis of a controller for a linearized model of an object; obtaining the values of the controller signals during modeling using the «white noise» signal; training a neural regulator; successively performing the optimization procedure and increasing the setpoint range to the required values. An example of applying the methodology on an object of a model of the angle of deviation θ of an object of an inverted pendulum is given.

Neural networks, regulation, closed systems, nonlinear objects, optimization

УДК 007.3

Н. А. Назаренко, П. И. Падерно
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Комплексные автоматизированные системы управления: подход к определению численности и квалификации операторов

Проведены комплексное исследование и всесторонний анализ возможных подходов к определению численности и квалификации операторов, действующих в условиях необходимости обработки большого количества разнородных задач. Предложен способ классификации задач и обрабатывающих их операторов, позволяющий в качестве начальной итерации распределить операторов по типам задач. Основной особенностью предлагаемого подхода является его ориентация на оценку и повышение эффективности функционирования комплексных автоматизированных систем управления с точки зрения максимизации получаемого дохода с учетом необходимых расходов и штрафов. На основе использования теории систем массового обслуживания получен ряд аналитических выражений и графических зависимостей, позволяющих в какой-то мере оценить необходимую численность и квалификацию операторов при решении конкретных задач в зависимости от имеющихся исходных данных. Указаны преимущества и возможные границы использования предлагаемого подхода. Результаты показали, что данный подход целесообразно использовать на ранних этапах разработки комплексных автоматизированных систем управления.

Автоматизированные системы управления, определение численности операторов, определение квалификации оператора, системы массового обслуживания, проектирование автоматизированных систем управления

На ранних этапах проектирования современных комплексных автоматизированных систем управления (КАСУ) различного назначения перед разработчиком в соответствии с требованиями

различных нормативно-технических документов (НТД) [1], [2] возникает комплекс задач эргономического обеспечения, основные из которых – проектирование алгоритмов деятельности (АД) оператора; определение численности и квалификации операторов и распределение функций между ними. Необходимость решения перечисленных задач на ранних этапах создания КАСУ обуславливается не только их влиянием на технические решения КАСУ, но и тем, что уже на этапе разработки рабочей конструкторской документации (РКД) решение этих задач должно быть уточнено окончательно.

Необходимость совместного решения задач определения численности и квалификации операторов была сформулирована в явном виде в [3]. Некоторые подходы к выполнению таких задач предпринимались в различное время [4]–[7], однако в них отсутствовали как формализованная постановка задачи, так и достаточно проработанные математические модели, позволяющие решать задачу оптимизации строгими методами. Эти задачи непосредственно связаны с распределением функций как между операторами, так и между оператором и комплексом программно-информационных средств [3], [8]. Кроме того, повышение эффективности КАСУ невозможно без детального анализа отдельных компонентов и четкого обоснования подхода к оценке эффективности системы в целом [1], [9], [10]. Обычно решение подобных задач связано с многокритериальной оптимизацией, однако при анализе множества Парето-оптимальных решений [11] в практике создания сложных человеко-машинных комплексов всегда возникают трудности, связанные с различными взглядами на специфику человеко-машинного взаимодействия. Время от времени различные исследователи [12]–[14] возвращаются к определению численности и квалификации операторов, формулируя и решая эти задачи с тех или иных позиций.

В настоящее время значительно увеличилось число КАСУ, которые предоставляют свои ресурсы в качестве справочных услуг, направленных на удовлетворение различных информационных запросов пользователей (например, call-центры). Кроме того, активно создаются ситуационные центры, основное назначение которых – получение, оперативная обработка и предоставление

больших объемов разнородной информации в удобном виде для операторов и лиц, принимающих решения (ЛПР). Поскольку проектирование и создание ситуационных центров – достаточно длительный процесс, а кроме всего прочего при этом требуется также спроектировать здания и помещения, в которых будут работать операторы и ЛПР, необходимость определения численности операторов (хотя бы ориентировочной) выходит на первое место. Затем следует оценка (определение, уточнение) необходимой квалификации операторов. Оценка и определение их численности и квалификации взаимосвязаны и должны опираться на характеристики решаемых задач. Основные требования, предъявляемые к организации этого процесса:

- возможность очередей для call-центров;
- недопустимость отказа в немедленной обработке поступающей информации, искажение или несвоевременная обработка которой могут повлечь огромные потери – для ситуационных центров и других КАСУ специального назначения.

Требование опережающего решения таких задач для ситуационных центров и КАСУ специального назначения вызвано, кроме всего перечисленного, необходимостью опережающего отбора и подготовки операторов, а также создания соответствующих тренажеров.

Основные положения. Рассматривается некоторая КАСУ, предназначенная для обработки потока задач: прием, обработка, решение и выдача информации – представления, визуализации результатов решения и т. п. В качестве моделей выбраны и использованы различные системы массового обслуживания (СМО) [15], детальный анализ и исследования которых позволяют обосновать рекомендации в части определения необходимой численности и квалификации операторов для различных КАСУ.

Характеристики – исходные (ориентировочные) данные и обозначения. Поток задач:

A_i – задача i -го типа, $i = 1, 2, \dots, n$;

n – количество типов задач;

λ_i – интенсивность потока задач i -го типа;

f_i – важность решения задачи i -го типа (возможно, определяет приоритетность в решении задач);

d_i – доход (выигрыш) за правильное решение задачи i -го типа;

r_i – штраф (проигрыш) за неправильное решение задачи i -го типа;

s_i – штраф (расход) за ожидание задачи i -го типа в очереди, пропорциональный длине очереди;

g_i – штраф (потери) за отказ от решения задачи i -го типа.

Операторы (квалификации, возможности, ограничения):

B_j – оператор j -й квалификации, $j = 1, 2, \dots, m$;

m – число видов различных квалификаций операторов.

Возможности операторов. Каждой квалификации операторов B_j , $j = 1, 2, \dots, m$ сопоставляется вектор, отражающий принципиальные возможности операторов данной квалификации решать поступающие задачи $\mathbf{c}_j = (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn})$, элементы которого c_{ji} равны 1, если оператор B_j может решить задачу A_i , $i = 1, 2, \dots, n$, и 0 в противном случае.

Элементы c_{jk} образуют матрицу $C = \{c_{jk}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, n$.

Классификация задач и операторов. Понятие близости (степени одинаковости, сходства).

Введем в рассмотрение некоторые меры сходства (близости) векторов, составленных только из нулей и единиц. Пусть у нас имеется два одномерных (состоящих из k элементов каждый) вектора $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$, каждый из элементов которых равен либо 0, либо 1.

Мера сходства 1. Если значение косинуса угла между векторами $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$ больше, чем 0.9, то будем полагать, что векторы одинаковые:

$$\cos(\mathbf{x} \wedge \mathbf{y}) = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}}{|\mathbf{x}| |\mathbf{y}|} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k y_i^2}}. \quad (1)$$

Мера сходства 2. Если относительное расстояние между векторами $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$, меньше 0.1, то будем полагать, что векторы одинаковые:

$$\rho_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2}}{k}. \quad (2)$$

Используя выбранное из (1) или (2) понятие сходства строк и столбцов соответственно, можем

перенумеровать исходные типы задач и классификаций операторов таким образом, чтобы после перестановки строк и столбцов матрицы C получить матрицу $\tilde{C} = \{\tilde{c}_{jk}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, n$, имеющую вид, похожий на

$$\tilde{C} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{Bmatrix},$$

где вдоль главной диагонали расположены матрицы из единиц, а остальные элементы, не входящие в эти матрицы являются, в основном, нулями.

Главным достоинством предложенного подхода является тот факт, что исключаются случаи попадания некоторой задачи на оператора, который принципиально не может ее решить. Использование такого подхода позволяет снизить размерность решаемой задачи, т. е. декомпозировать исходную задачу до уровня определения численности отдельных групп операторов, обладающих близкой квалификацией, т. е. ориентированных на решение сходных задач, принадлежащих одной группе.

В дальнейшем будем полагать, что классификация задач и операторов закончена, т. е. операторы и задачи уже распределены по некоторым группам (категориям) таким образом, что каждый оператор может правильно решить любую из поступающих задач, хотя и за различное время и с различной вероятностью.

Это упрощает постановку исходной задачи определения численности и квалификации операторов, сводя ее к определению численности операторов в некоторой СМО с неоднородным потоком входных задач.

Формирование исходных данных. Для итеративного решения полученной задачи определения численности некоторой группы операторов на начальной стадии проведем усреднение как операторов, так и задач, т. е. построим соответствующие усредненные модели с учетом частоты (интенсивности) возникновения необходимости решения отдельных рабочих задач.

Усреднение характеристик задач в рамках отдельной группы. Интенсивность поступления

задач $\lambda = \sum_{i=1}^k \lambda_i$, где k – число рабочих задач, решаемых данной группой операторов.

Средние значения других характеристик потока задач будем искать как средневзвешенное арифметическое составляющих:

– средний доход, начисляемый за правильное решение задачи: $d = \sum_{i=1}^k \lambda_i d_i / \sum_{i=1}^k \lambda_i$;

– средний штраф (проигрыш) за неправильное решение задачи: $r = \sum_{i=1}^k \lambda_i r_i / \sum_{i=1}^k \lambda_i$;

– средний штраф за ожидание задачи в очереди: $s = \sum_{i=1}^k \lambda_i s_i / \sum_{i=1}^k \lambda_i$;

– средний штраф (потери) за отказ от решения задачи: $g = \sum_{i=1}^k \lambda_i g_i / \sum_{i=1}^k \lambda_i$;

– средняя важность решения задачи: $f = \sum_{i=1}^k \lambda_i f_i / \sum_{i=1}^k \lambda_i$.

Для получения средних характеристик группы операторов рассмотрим и проанализируем данные, которые изначально отражают деятельность операторов группы, представленные в виде следующего набора матриц:

– матрица $T = \{t_{ij}\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, k$, элементами которой являются средние времена, необходимые i -му оператору рассматриваемой квалификации (всего m операторов) для решения j -й задачи, поступающей в данную группу;

– матрица $\beta^1 = \{\beta_{ij}^1\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, k$, элементы которой – вероятности правильного решения i -м оператором рассматриваемой квалификации j -й задачи, поступающей в данную группу;

– матрица $\beta^0 = \{\beta_{ij}^0\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, k$, элементы которой – вероятности неправильного решения i -м оператором рассматриваемой квалификации j -й задачи, поступающей в данную группу;

– матрица $Q = \{q_{ij}\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, k$, элементы которой – ресурсы времени, необходимые i -му оператору рассматриваемой квалификации для решения j -й задачи, поступающей в данную группу.

Замечания:

1. Ресурсы могут быть различными, т. е. вообще говоря, речь может идти о некоторых векторах ресурсов, компонентами которых могут быть различные материальные и информационные составляющие.

2. Для каждого оператора и каждой задачи выполняется соотношение $\beta_{ij}^1 + \beta_{ij}^0 = 1$.

Ввиду предполагаемого равенства операторов усреднение показателей их деятельности должно учитывать их равноправие, а также интенсивности поступления различных задач. Таким образом, получаем следующие показатели, характеризующие деятельность среднего оператора:

– среднее время решения задачи: $t_{cp} = \left[\sum_{j=1}^k \left(\lambda_j \sum_{i=1}^m t_{ij} \right) \right] / \left(m \sum_{j=1}^k \lambda_j \right)$;

– средняя вероятность правильного решения задачи: $\beta_{cp}^1 = \left[\sum_{j=1}^k \left(\lambda_j \sum_{i=1}^m \beta_{ij}^1 \right) \right] / \left(m \sum_{j=1}^k \lambda_j \right)$;

– средняя вероятность неправильного решения задачи: $\beta_{cp}^0 = \left[\sum_{j=1}^k \left(\lambda_j \sum_{i=1}^m \beta_{ij}^0 \right) \right] / \left(m \sum_{j=1}^k \lambda_j \right)$;

– средний ресурс, необходимый для решения задачи: $q_{cp} = \left[\sum_{j=1}^k \left(\lambda_j \sum_{i=1}^m q_{ij} \right) \right] / \left(m \sum_{j=1}^k \lambda_j \right)$.

Полученные средние показатели следует понимать таким образом: t_{cp} – среднее время, необходимое оператору для получения, восприятия и переработки в соответствии с заданным (предписанным) АД некоторой информации, а также представления обработанной информации в заданном формате (подготовки к выдаче по требованию) ЛПР или пользователю.

Замечания:

1. Для β_{cp}^1 и β_{cp}^0 , так же, как и для β_{ij}^1 и β_{ij}^0 выполняется соотношение $\beta_{cp}^1 + \beta_{cp}^0 = 1$.

2. В случае векторного ресурса формула для компонент аналогична.

Подход к решению. Пусть в КАСУ для решения задач одного типа одновременно задействованы k операторов (автоматизированных рабочих мест (АРМ)).

Рассмотрим изначальное распределение потока задач отдельно по всем АРМ, задействованным параллельно (одновременно, в одну смену). Это можно интерпретировать как рассмотрение некоторой совокупности СМО, каждая из которых включает один обслуживающий прибор, при этом интенсивность входящего потока задач $\tilde{\lambda} = \lambda/k$, а интенсивность обслуживания $\tilde{\mu} = 1/t_{\text{ср}}$.

Замечание: такой подход преследует две цели:

1. Получение мажорирующего (худшего) результата за счет:

– изначального распараллеливания потоков задач;

– ухода от нормального закона, описывающего среднее время решения задачи и обусловленного используемой нормируемой суммой независимых одинаково (или близко) распределенных случайных величин, и использования интенсивности обслуживания.

2. Упрощение расчетов.

Рассмотрим несколько случаев.

Случай 1. СМО с неограниченной очередью. В этом случае все задачи, в конце концов, решаются оператором, т. е. ситуация, связанная с отказом, в решении задач отсутствует.

Сначала оценим некоторый средний доход, который приносит решение одной задачи (с учетом возможной ошибки, которая может быть допущена при ее решении, штрафов и расхода ресурсов):

$$h = d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0 - q_{\text{ср}}.$$

Получаем коэффициент $\rho_0 = \tilde{\lambda}/\tilde{\mu}$. Вычисляем вероятности того, что в системе находится i задач $p_i = \rho_0 \rho_0^i = (1 - \rho_0) \rho_0^i$. Для оценки расхода ресурсов на штрафы используем значение среднего числа задач, находящихся в очереди $n_{\text{оч}} = \frac{\rho_0^2}{1 - \rho_0}$. Тогда значение среднего дохода от

решения задачи с учетом возможного нахождения задачи в очереди, может быть оценено как

$$z = hn_{\text{об}} - sn_{\text{оч}} = \left(d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0 - q_{\text{ср}} \right) - s \frac{\rho_0^2}{1 - \rho_0}, \quad (3)$$

где $n_{\text{об}}$ – общее количество задач.

Анализ различных изменений в СМО.

1. Варьирование квалификации оператора – квалификация может сказываться на значениях следующих параметров: $\beta_{\text{ср}}^1, \beta_{\text{ср}}^0, q_{\text{ср}}, t_{\text{ср}}$. Как несложно видеть, изменение $t_{\text{ср}}$ влечет за собой пропорциональное изменение параметра ρ_0 .

В дальнейшем будем полагать, что повышение квалификации оператора направлено *только на сокращение* времени решения задачи без изменения вероятностей правильного и ошибочного их выполнения.

Начальное условие $q_{\text{ср}}, t_{\text{ср}}$. Сокращение времени решения задачи в x раз влечет за собой убывание показателя ρ_0 в x раз, т. е. $\rho_0(x) = \rho_0/x$. При этом расходы (зарплата оператору) должны возрасти. В качестве одной из элементарных функций, отражающих возрастание зарплаты, рассмотрим функцию $q(x) = q_{\text{ср}} \sqrt{x}$. Подставляя ее в (3), получаем функцию

$$\begin{aligned} z(x) &= \left(d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0 - q_{\text{ср}} \sqrt{x} \right) - s \frac{\rho_0^2/x^2}{1 - \rho_0/x} = \\ &= \left(d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0 \right) - \left(q_{\text{ср}} \sqrt{x} + s \frac{\rho_0^2}{x^2 - \rho_0 x} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Заметим, что постоянная часть функции $z(x)$, связанная с использованием вероятностей правильного и ошибочного решения задачи, на нахождение ее максимума никак не влияет. Введем обозначение $\Delta = s/q_{\text{ср}}$. Тогда (4) принимает вид

$$z(x) = \left(d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0 \right) - q_{\text{ср}} \left(\sqrt{x} + \Delta \frac{\rho_0^2}{x^2 - \rho_0 x} \right)$$

и задача нахождения максимума функции $z(x)$, т. е. определения наилучшей квалификации оператора для решения описанных задач в заданных условиях, сводится к нахождению минимума функции $z_1(x)$ (в области $1 \leq x \leq 2$):

$$z_1(x) = \sqrt{x} + \Delta \frac{\rho_0^2}{x^2 - \rho_0 x}. \quad (5)$$

Наличие границ области обусловлено следующими факторами – нижняя граница ($x = 1$) указывает на то, что, по нашему предположению, имеющейся квалификации оператора (скорости решения задач) может быть недостаточно, а значение

правой границы ($x = 2$) указывает на то, что резервы оператора в направлении увеличения темпа работы (скорости решения задачи) ограничены.

Замечание: из вида функции (5) можно сделать вывод, что она имеет экстремум (минимум) в области $x > \rho_0$.

Варьирование параметра Δ позволяет рассматривать (анализировать) широкий круг задач для различных проблемных областей – от call-центров, в которых цена за ожидание достаточно мала, до комплексов специального назначения, в которых ожидание практически недопустимо.

Анализ частных случаев.

1. Параметр ρ_0 находится на интервале $(0; 0.2]$.

В этом случае функцию $z_1(x)$ в области $x > 1$ можно достаточно хорошо аппроксимировать функцией $\tilde{z}_1(x) = \sqrt{x} + \Delta \frac{\rho_0^2}{x^2}$, максимальное значение которой достигается при значении $x = (4\Delta\rho_0^2)^{0.4}$, т. е. $x < 1$, при достаточно небольших штрафных функциях.

Интерпретация. Полученное соотношение свидетельствует о том, что при достаточно небольших значениях штрафных функций и малых значениях ρ_0 следует не повышать расходы на решение задачи (оплату оператора некоторой квалификации), а, возможно, задуматься о необходимости снижения расходов за счет привлечения оператора меньшей квалификации с меньшей зарплатой.

2. Параметр ρ_0 находится на интервале $(0; 0.8]$.

В этом случае, если штрафные функции малы, то второе слагаемое в функции $z_1(x)$ (5) вносит малый вклад и функция $z_1(x)$ в области $x > 1$ монотонно возрастает, что указывает на нецелесообразность изменения квалификации оператора.

3. Параметр ρ_0 находится на интервале $[0.8; 1]$.

Для того чтобы этот параметр x , при котором функция имеет экстремум, находился в области $1 \leq x \leq 2$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие соотношения:

а) соотношение $z'_1(1) < 0$, которое свидетельствует о том, что функция $z_1(x)$ (расходы и штрафы) при $x = 1$ еще не достигла своего минимума, т. е. при имеющейся ситуации квалификацию и зарплату оператора следует увеличить.

Так как $z'_1(1) = \frac{1}{2} - \Delta \frac{(2 - \rho_0)\rho_0^2}{(1 - \rho_0)^2}$, то выполнение

неравенства $z'_1(1) < 0$ требует выполнения неравенства

$$\Delta > \frac{(1 - \rho_0)^2}{2(2 - \rho_0)\rho_0^2},$$

что и определяет наличие выбора оператора с большей квалификацией.

Замечание: функция $y = \frac{(1 - \rho_0)^2}{2(2 - \rho_0)\rho_0^2}$ монотонно убывает на интервале $[0.8; 1]$ (рис. 1, а, в);

б) соотношение $z'_1(2) > 0$, которое свидетельствует о том, что функция $z_1(x)$ (расходы и штрафы) уже достигла своего минимума в заданной области.

Поскольку $z'_1(2) = \frac{1}{2\sqrt{2}} - \Delta \frac{(4 - \rho_0)\rho_0^2}{4(2 - \rho_0)^2}$, то выполнение

неравенства $z'_1(2) > 0$ требует выполнения неравенства

$$\Delta < \sqrt{2} \frac{(2 - \rho_0)^2}{(4 - \rho_0)\rho_0^2}, \quad (6)$$

что и определяет наличие выбора оператора с большей квалификацией (рис. 1, б, з).

Невыполнение неравенства (6) свидетельствует о том, что максимум функции $z_1(x)$ из (5) достигается вне области $1 \leq x \leq 2$ (за правой границей, т. е. при $x > 2$), что в действительности не представляется возможным. В этом случае снижение расходов, связанных с ожиданием задач в очереди, возможно только при увеличении числа операторов $k \uparrow$, параллельно (независимо) решающих поступающие задачи, так как $\rho_0 = \tilde{\lambda}/\tilde{\mu} = \lambda/(k\tilde{\mu})$.

Случай 2. Очередь недопустима. Если в момент поступления задачи отдельная СМО занята, то задача теряется (штраф g), а не перенаправляется другому оператору. В каждой СМО не может быть больше одной задачи.

Вероятность отсутствия задачи в СМО (система свободна) $p_0 = 1/(1 + \rho_0)$ – вероятность того, что поступившая задача будет обслужена.

Вероятность наличия задачи в СМО (система занята) $p_1 = \rho_0/(1 + \rho_0)$ – вероятность того, что поступившая задача не будет обслужена (отказ в обслуживании).

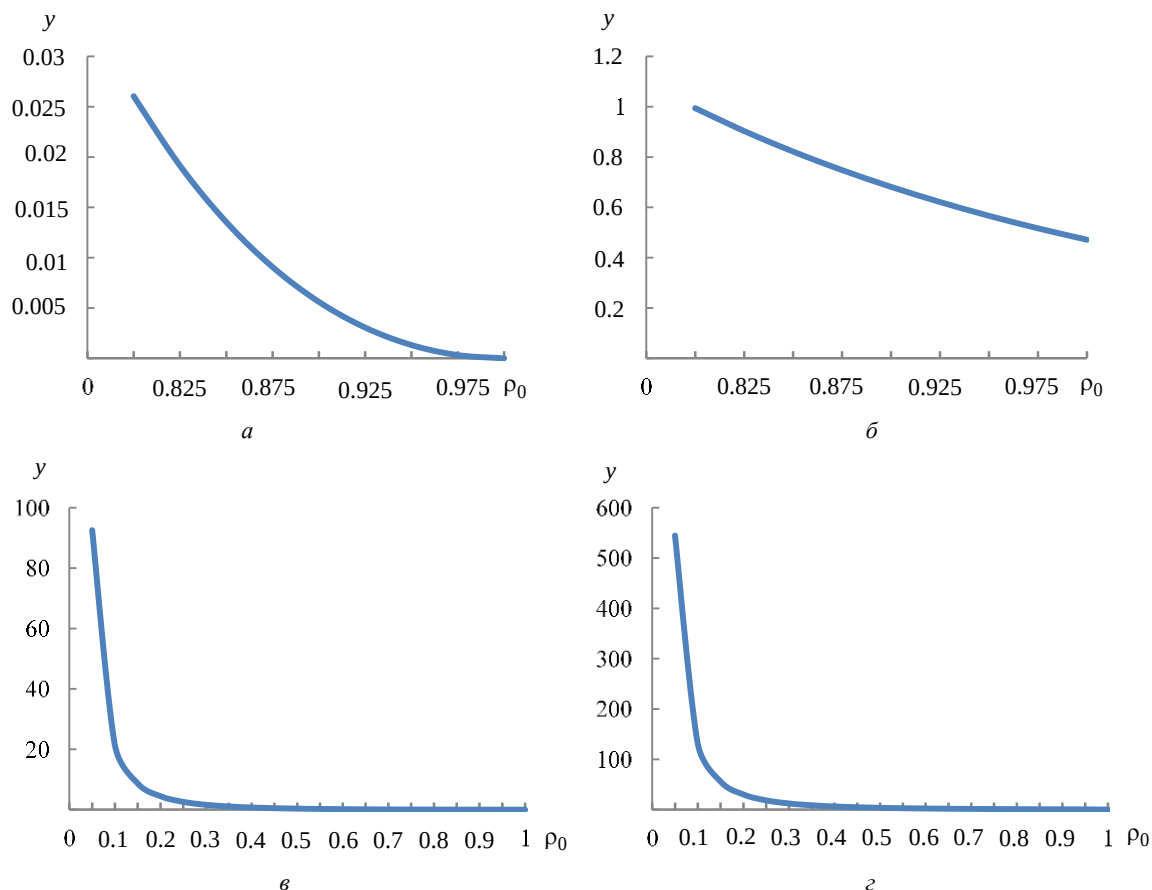


Рис. 1

Рассмотрим функцию среднего дохода от решения некоторой задачи с учетом расходов и штрафов

$$h = \left[(d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0) - q_{\text{ср}} \right] \frac{1}{1+\rho_0} - g \frac{\rho_0}{1+\rho_0} =$$

$$= \left[(d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0) - q_{\text{ср}} + g \right] \frac{1}{1+\rho_0} - g. \quad (7)$$

Из (7) видно, что слагаемые в круглых скобках, отражающие возможные доходы и потери вследствие возможных ошибок оператора, вероятности которых полагаем неизменными, а также штраф за отказ от решения задачи не зависят от скорости работы (квалификации) оператора.

Будем полагать, что увеличение скорости работы оператора в x раз, т. е. снижение значения параметра ρ_0 в x раз, также требует увеличения оплаты оператора (зависимость $q(x) = q_{\text{ср}} \sqrt{x}$, область возможных значений аргумента $1 \leq x \leq 2$).

В этом случае выражение (7) приобретает следующий вид:

$$h(x) = (L - q_{\text{ср}} \sqrt{x}) \frac{x}{x + \rho_0} - g,$$

где $L = d\beta_{\text{ср}}^1 - r\beta_{\text{ср}}^0 + g$.

По аналогии со случаем 1 будем полагать, что для того чтобы максимум находился в области $1 \leq x \leq 2$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие неравенства:

$$h'_1(1) > 0; \quad h'_1(2) < 0. \quad (8)$$

Выполнение первого из этих неравенств свидетельствует о том, что функция еще не достигла своего максимума, т. е. вопрос о повышении скорости работы оператора актуален.

Выполнение второго из этих неравенств свидетельствует о том, что функция достигает своего максимума в области $1 \leq x \leq 2$, в то время как невыполнение этого неравенства, т. е. $h'_1(2) > 0$, указывает на необходимость изначального увеличения числа каналов (параллельно и независимо работающих операторов) ввиду невозможности стабильного увеличения темпа решения (выполнения) задачи в 2 раза.

$$\text{Так как } h'(x) = \frac{2L\rho_0 - 3q_{\text{ср}}\sqrt{x}\rho_0 - q_{\text{ср}}x\sqrt{x}}{2(x + \rho_0)^2}, \text{ то}$$

вместо (8) получаем необходимость выполнения следующей системы неравенств:

$$L > \frac{q_{cp}(3\rho_0 + 1)}{2\rho_0}; \quad L < \frac{q_{cp}(3\rho_0\sqrt{2} + 2\sqrt{2})}{2\rho_0}.$$

Учитывая, что $L = d\beta_{cp}^1 - r\beta_{cp}^0 + g$, получаем следующее двустороннее неравенство:

$$\begin{aligned} & \frac{q_{cp}(3\rho_0 + 1)}{2\rho_0} - d\beta_{cp}^1 + r\beta_{cp}^0 < \\ & < g < \frac{q_{cp}(3\rho_0\sqrt{2} + 2\sqrt{2})}{2\rho_0} - d\beta_{cp}^1 + r\beta_{cp}^0. \end{aligned} \quad (9)$$

Невыполнение левой части неравенства (9) указывает на излишнюю квалификацию оператора (как следствие, возможно сокращение числа операторов) при таком значении штрафа за отказ в решении поступившей задачи, а невыполнение правой части неравенства (9) указывает на необходимость увеличения числа операторов при таком значении штрафа за отказ в решении поступившей задачи.

Выполнение обеих частей неравенства (9) указывает на то, что, при заданном значении штрафа (g) за отказ в решении поступившей задачи искомое значение изменения (увеличения) квалификации оператора находится в области $1 \leq x \leq 2$, и его можно найти, решив уравнение

$$t^3 + 3t - 2L\rho_0/q_{cp} = 0, \quad x = t^2. \quad (10)$$

Общий случай. КАСУ предназначена для обработки различных потоков задач, когда каждый поток поступает на выделенную группу операторов, причем очередь недопустима, т. е. штрафы очень велики. Это означает, что для рассматриваемой КАСУ отказ в решении задачи может повлечь очень большие убытки, обусловленные возможным пропуском важнейшей информации и/или ее несвоевременным предоставлением ЛППР.

Возможны два различных варианта обработки поступающих задач по каждой группе операторов. При этом целесообразно использовать единый вариант обработки задач для всех групп операторов, чтобы при переходе из группы в группу сохранялась преемственность.

Вариант 1. По каждой группе задач (операторов) отдельные потоки заявок с интенсивностью λ_i поступают случайно (нерегулируемо) операторам (k_i – число операторов в i -й группе) (рис. 2).

Используя результаты, полученные для случая 2, можно выбрать рациональное число операторов и их численность. При этом следует принимать во внимание, что в будущем в некоторых ситуациях возможно повышение интенсивности потока входящих задач, т. е. при проектировании КАСУ такого типа целесообразно предусмотреть

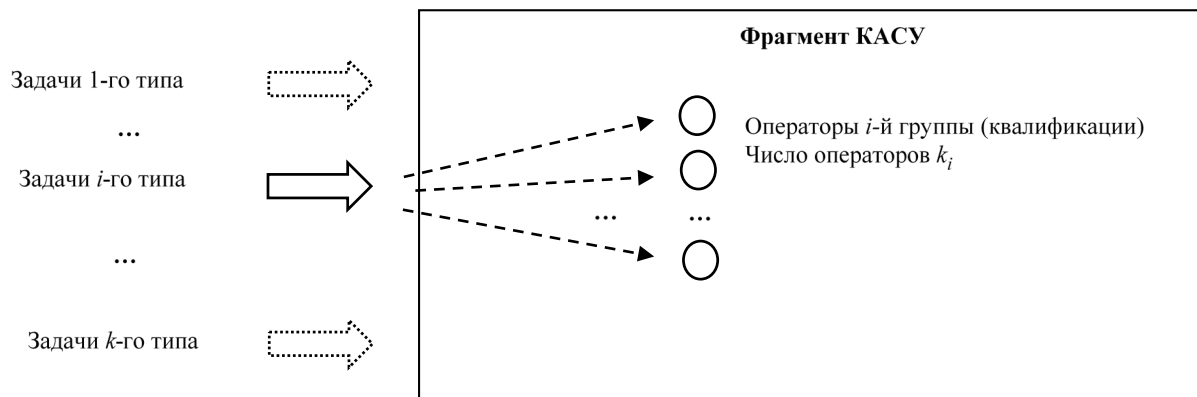


Рис. 2

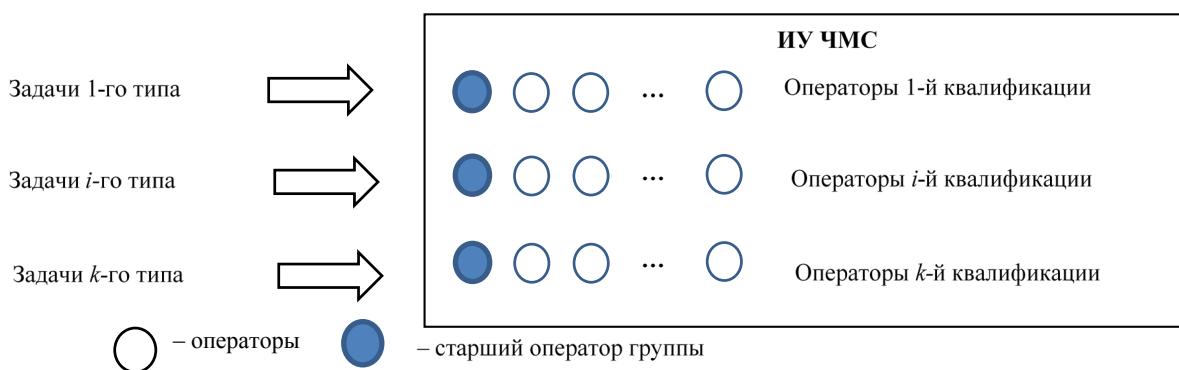


Рис. 3

наличие резервных АРМ, которые в обычной обстановке могут и не эксплуатироваться, т. е. находиться в резерве.

Вариант 2. Выделение в каждой из групп старшего оператора, распределяющего задачи по остальным, который, кроме того, может также подключаться к обработке поступивших задач, если все остальные операторы этой группы заняты (рис. 3).

Заметим, что если в предыдущем варианте отдельной СМО был *оператор*, то в данном случае отдельной СМО является *группа операторов*. Проведем анализ подсистемы КАСУ, состоящей из операторов i -й квалификации, предназначенных для решения задач i -го типа.

Чтобы решить задачу определения численности и квалификации операторов для такой подсистемы, используем следующий подход.

Шаг 1. В качестве начального приближения используем операторов с квалификацией, полученной в процессе нахождения решения уравнения (10) при условии выполнения соотношений (9).

Замечание: если соотношения (9) не выполнены, что зачастую бывает при достаточно большом значении параметра g , т. е. при невыполнении правой части неравенства, то для каждой подсистемы следует задавать некоторую вероятность γ , с которой произвольная задача по обработке информации, поступившей в анализируемую подсистему, должна быть решена и ее решение представлено соответствующему ЛПР или выведено на средство отображения информации коллективного пользования (СОИ КП).

Шаг 2. Для операторов с определенной ранее квалификацией вычислим значение вероятности занятости системы

$$p_Z = \frac{\rho^{k_i} / k_i!}{\sum_{l=1}^{k_i} \rho^l / l!}, \quad (11)$$

так как вероятность нахождения в системе j требований равна

$$p_j = \frac{\rho^j / j!}{\sum_{l=1}^{k_i} \rho^l / l!}.$$

Для данного случая средний доход от решения задачи без учета расходов, но с учетом доходов (выигрышей) d и штрафов, как за неправильное выполнение поставленной задачи r , так и за отказ в выполнении задачи g , по аналогии с (7) будет выглядеть следующим образом:

$$h = (d\beta_{cp}^1 - r\beta_{cp}^0)(1 - p_Z) - gp_Z = \\ = (d\beta_{cp}^1 - r\beta_{cp}^0) - p_Z(d\beta_{cp}^1 - r\beta_{cp}^0 + g). \quad (12)$$

Поскольку повышение квалификации операторов влияет только на быстродействие, т. е. на среднее время решения (выполнения) задачи, и не влияет на безошибочность, то выражение $d\beta_{cp}^1 - r\beta_{cp}^0$ постоянно, т. е. не зависит от квалификации оператора. Введем обозначение $s = d\beta_{cp}^1 - r\beta_{cp}^0$. Тогда (12) может быть представлено в более удобном виде:

$$h = s - p_Z(s + g). \quad (13)$$

Заметим, что в (13) не учтены расходы на операторов. Если же при этом принять во внимание расходы на операторов, зависящие от их уровня квалификации $1 \leq x \leq 2$, то (13) можно переписать в виде

$$h = s - p_Z(s + g) - kq\sqrt{x}.$$

Следует заметить, что вероятность p_Z из (11) зависит не только от числа операторов (k_i), но и от их квалификации (x , $1 \leq x \leq 2$), которая влияет на время выполнения задачи (выполняется соотношение $\rho(x) = \rho/x$). Таким образом, речь идет об отыскании экстремума $h(k, x)$ – функции двух переменных, одна из которых – целая, а другая находится в интервале от 1 до 2:

$$h(k, x) = s - (s + g) \frac{(\rho/x)^k / k!}{\sum_{l=1}^k (\rho/x)^l / l!} - kq\sqrt{x}.$$

Решение такой задачи можно получить в численном виде.

Замечание: если при численном определении экстремума функции $h(k, x)$ получается значение $x < 1$, то это означает, что квалификация и оплата операторов на настоящий момент (при имеющихся значениях оплаты и штрафов) завышены и их можно снизить.

Предложен подход к определению и оценке численности и квалификации операторов КАСУ в процессе проектирования, основанный на использовании различных СМО и комплексном определении их характеристик. Данный подход отличается от известных не только упрощением за счет распараллеливания работы, но и возможностью учета различных доходов и штрафов.

Предложенный подход в значительной степени упрощает работу разработчиков при определении и

оценке численности и квалификации операторов КАСУ на ранних стадиях проектирования, а также позволяет интерпретировать получаемые результаты способом, понятным для разработчиков КАСУ.

Подход основан на использовании достаточно большого количества исходных данных, характеризующих как входящие потоки информации (задач), требующей своевременной и безошибочной обработки и представления результатов (ЛПР или пользователей), так и особенности работы опера-

торов. Недостаточно точные знания некоторых характеристик могут быть нивелированы за счет предлагаемых процедур усреднения.

Предложенный подход может быть положен в основу комплексного метода определения и оценки численности и квалификации операторов КАСУ на всех стадиях их проектирования, что позволит разработчику в значительной степени снизить объем расчетных операций и упростить его работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ РВ 0029-00.002–2018. Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Эргономическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.
2. ГОСТ 15.016–2016. Система разработки и постановки продукции на производство (СПП). Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. М.: Стандартинформ, 2017.
3. Информационно-управляющие человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания: справочник / под общ. ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993.
4. Гвоздик М. И., Евграфов В. Г., Цой Е. Б. Оптимизация организационно-технических систем ВМФ: методы, алгоритмы, программы. Петродворец: Изд-во ВВМУРЭ, 1997.
5. Зигель А., Вольф Д. М. Модель группового поведения в системе человек – машина / под ред. Г. Е. Журавлева, пер. с англ. А. А. Какунина. М.: Мир, 1973.
6. Евграфов В. Г., Захаров Г. А., Падерно П. И. Эргономическое обеспечение и автоматизация процесса проектирования и испытаний человеко-машинных систем // Судостроение. 1986. № 10. С. 34–39.
7. Евграфов В. Г., Падерно П. И. Определение численности персонала в иерархических человеко-машинных системах // Изв. СПбГЭТУ. 1993. Вып. 467. С. 75–78.
8. Лавров Е. А. Многокритериальное распределение функций между человеком и техникой для повышения безопасности процессов и систем // Ин-

формационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте: сб. науч. тр. Харьков, 1996. Вып. 3. С. 15–20.

9. Пятибратов А. П. Человеко-машинные системы: эффект эргономического обеспечения. М.: Экономика, 1987.

10. Межотраслевая методика расчета социально-экономической эффективности от внедрения достижений эргономики в народное хозяйство. М.: Экономика, 1988.

11. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982.

12. Падерно П. И., Бурков Е. А., Назаренко Н. А. Качество информационных систем: учеб. для вузов по направлению подгот. «Информационные системы и технологии». М.: Академия, 2015.

13. Метод поддержки принятия решений по обеспечению эргономического качества в полиэргатических центрах управления ИТ-ресурсами / Е. А. Лавров, Н. Б. Пасько, П. И. Падерно, А. А. Волосюк, В. И. Кизенко // Всерос. науч. конф. по проблемам управления в технических системах. СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. Т. 1. С. 170–174.

14. Нефедович А. В. Практическая эргономика при создании кораблей ВМФ. СПб.: НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2019.

15. Каштанов В. А., Ивченко Г. И., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: Книжный дом «Либроком», 2012.

N. A. Nazarenko, P. I. Paderno
Saint Petersburg Electrotechnical University

INTEGRATED AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEMS: APPROACH TO DETERMINING THE NUMBER AND QUALIFICATION OF OPERATORS

A comprehensive study and comprehensive analysis of possible approaches to determining the number and qualification of operators working in conditions of the need to process a large number of heterogeneous tasks are carried out. A method for classifying problems and their processing operators is proposed, which allows distributing operators by task types as an initial iteration. The main feature of the proposed approach is its focus on evaluating and improving the efficiency of complex automated management systems in terms of maximizing revenue, taking into account the necessary costs and penalties. Based on the theory of Queuing systems, a number of analytical expressions and graphical dependencies are obtained that allow us to obtain some estimates for the required number and qualification of operators for solving specific tasks, depending on the available source data. The advantages and possible limits of using the proposed approach are indicated. The results showed that the proposed approach should be used at the early stages of development of complex automated control systems.

Automated control systems, determining the number of operators, determining the qualifications of operators, queuing systems, designing automated control systems