

УДК 004.5

Н. А. Назаренко

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Оценка качества взаимодействия операторов с автоматизированными системами управления

*Представлена модель эргономического качества взаимодействия оператора с автоматизированной системой управления (АСУ), а также комплекс расчетных выражений для оценки параметров, входящих в модель. Особенностью модели и комплекса является простота использования и необходимый для анализа деятельности операторов АСУ минимум параметров. Представленные для расчета параметров формулы достаточно просты и понятны специалистам в области разработки современных АСУ и в значительной степени упрощают их расчетную деятельность. Модель представлена как в графическом виде, так и с помощью коротких формул. Представленные результаты могут применяться в качестве методологического базиса информационной поддержки разработчиков сложных систем и комплексов, а также при анализе рабочей деятельности операторов различного типа. Это позволит стандартизировать анализ рабочей деятельности операторов АСУ, а также повысить эффективность разработки сложных АСУ за счет более оптимального выбора технических решений компонентов АСУ из возможного многообразия вариантов*

**Автоматизированные системы управления, качество взаимодействия оператора, алгоритмы деятельности, коэффициент загруженности, коэффициент напряженности, показатель логической сложности, показатель стереотипности, качество информационной поддержки, оценка временных показателей**

Деятельность оператора протекает преимущественно с использованием АСУ различной сложности, при этом ему приходится взаимодействовать как с программным обеспечением (ПО), так и с аппаратной (физической) частью АСУ. При всевозрастающей степени автоматизации некоторые функции человека отмирают или частично ограничиваются, другие – расширяются и усложняются. Основная и постоянная функция оператора как составного звена, автоматизированной системы управления (АСУ) связана с переработкой информации. Оператор воспринимает информацию в виде временных, пространственных и абстрактных форм, разбивает ее на категории и структурные группы, адекватные для ее применения и передачи в звенья других систем. Кроме того, он принимает решения с различной степенью ответственности, что сказывается на его эмоциональной напряженности. Принятие решений происходит уже при обработке информации и предписании системе тех или иных задач. Будучи звеном системы управления, человек, в то же время, может работать в составе группы операторов, каждый из которых выполняет опре-

деленную функцию, что в свою очередь возлагает на него дополнительные рабочие обязанности. В связи с этим для разработки, а также анализа современных АСУ необходимо иметь детальное представление о качестве взаимодействия оператора с АСУ.

Качество взаимодействия оператора с АСУ представлено на рис. 1 и характеризуется следующими параметрами.

Формально модель качества взаимодействия оператора с системой описывается следующим множеством:

$$\{Q_{UX}\} = \{\{Q_{UA}\}, \{Q_{sub}\}, \{Q_{SA}\}\},$$

где  $\{Q_{UA}\}$ ,  $\{Q_{sub}\}$ ,  $\{Q_{SA}\}$  – множества параметров, описывающих качество деятельности оператора при выполнении им рабочих задач; подсистем, непосредственно влияющих на взаимодействие оператора с АСУ; системы с точки зрения ее влияния на действия оператора соответственно.

Рассмотрим данные множества более подробно.



Рис. 1

**Качество системы взаимодействия.** Данный показатель характеризует качество системы при выполнении оператором рабочих задач и описывается следующим множеством:

$$\{Q_{SA}\} = \{V_I, \{Q_{AS}\}, Q_{ASL}\},$$

где  $V_I$  – объем вводимой оператором информации. Считается, что чем меньше объем информации, вводимой оператором вручную, а также повторно, тем выше эргономическое качество исследуемого пользовательского интерфейса (ПИ) ПО. Рассчитывается по формуле

$$V_I = k_{p.v} = \frac{N_{p.v}}{N_{эл.в}},$$

где  $N_{p.v}$  – количество случаев ручного ввода информации оператором;  $N_{эл.в}$  – количество элементов ввода информации оператором;  $\{Q_{AS}\}$  – множество, описывающее качество алгоритмов реакции системы на действия оператора;  $Q_{ASL}$  – коэффициент адекватности сенсоромоторных нагрузок возможностям оператора по восприятию и переработке информации.

**Качество подсистем.** Данный показатель характеризует качество взаимодействия оператора с различными подсистемами АСУ:

$$\{Q_{sub}\} = \{k_{SU}, Q_{IS}, Q_{EPCS}\},$$

где  $k_{SU}$  – коэффициент стандартизации и унификации АСУ;  $Q_{IS}$  – качество информационной поддержки;  $Q_{EPCS}$  – качество системы предотвращения и исправления ошибок.

**Коэффициент стандартизации и унификации АСУ ( $k_{SU}$ ).** Чем больше данный коэффициент, тем выше эргономическое качество АСУ и, следовательно, легче обучение будущих операторов и ориентация их в системе; тем самым опосредованно снижается вероятность произвольных ошибок в работе. Коэффициент стандартизации и унификации зависит от двух независимых друг от друга коэффициентов:  $k_{St}$  – коэффициент стандартизации, позволяет судить о том, насколько АСУ, соответствует общепризнанным стандартам (международным и государственным);  $k_U$  – коэффициент унификации, показывает внутреннюю унификацию различных элементов АСУ.

Коэффициент стандартизации и унификации вычисляется по формуле

$$k_{SU} = k_{St}k_U.$$

Коэффициент стандартизации характеризует то, насколько АСУ похожа на другие, аналогичные системы, и рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{St} = \frac{N_{St}}{N},$$

где  $N_{St}$  – количество стандартных элементов (кнопок, кодов, информационных (управляющих) блоков и т. п.);  $N$  – общее количество элементов.

Коэффициент унификации характеризует то, насколько АСУ внутренне согласована (т. е. единообразна по дизайну, представлению информации и функционалу), и рассчитывается по следующей формуле:

$$k_U = \frac{N_U}{N},$$

где  $N_U$  – количество унифицированных элементов (кнопок, кодов, информационных (управляющих) блоков и т. п.);  $N$  – общее количество элементов.

**Качество информационной поддержки** ( $Q_{IS}$ ). Данный показатель характеризует качество разработанных подсистем информационной поддержки оператора в его рабочей деятельности (справочная подсистема, различные информационные подсказки и т. п.).

**Качество системы предотвращения и исправления ошибок** ( $Q_{EPCS}$ ). Эргономическое качество системы характеризуется прежде всего числом произвольных ошибок оператора ( $N_E$ ), качеством системы валидации ( $Q_{VS}$ ), а также качеством сообщений об ошибках ( $Q_{EM}$ ):

$$Q_{EPCS} = \{N_E, Q_{VS}, Q_{EM}\}.$$

**Число произвольных ошибок оператора** ( $N_E$ ). Существует ряд подходов к классификации ошибок оператора в зависимости от целей их изучения. Эти подходы можно различать по названиям основополагающего классификационного признака [1]:

1. По месту ошибки в структуре функционирования АСУ.
2. По системам человека, на которые падает основная нагрузка при выполнении операции.
3. По ошибкам поведения оператора.
4. По причинам ошибок.
5. По следствиям ошибок.
6. По характеру нарушения правильности функционирования.
7. По средствам обнаружения ошибок.
8. По средствам предупреждения ошибок.
9. По отклонениям в действиях оператора.

Данный параметр можно оценить только с помощью проведения эксперимента с привлечением пользователей, а значит, он может быть определен только на заключительных этапах создания АСУ, когда уже есть ее прототип (опытный образец).

*Замечание.* При проведении анализа результатов экспериментов необходимо ранжировать найденные ошибки по их влиянию на эффективность работы АСУ.

**Качество системы валидации** ( $Q_{VS}$ ). Система валидации – система обнаружения и предотвращения ошибок оператора. Качество системы

Таблица 1

Требование	Значение
Валидация осуществляется в режиме реального времени	1 – Да 0 – Нет
При валидации введенные данные пользователей сохраняются	1 – Да 0.5 – Данные сохраняются частично 0 – Нет
Используются значения и установки «по умолчанию»	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет
Отмечены обязательные для заполнения поля	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет
Используются маски ввода информации	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет
Используется автозаполнение форм	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет
Используются подсказки для ввода данных	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет
Структуры заполняемых форм понятны оператору	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет
Для полей ввода количественных характеристик (длина, вес, скорость и т. д.) указываются единицы измерения	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет
Поля форм сгруппированы по смыслу	1 – Да 0.5 – Частично 0 – Нет

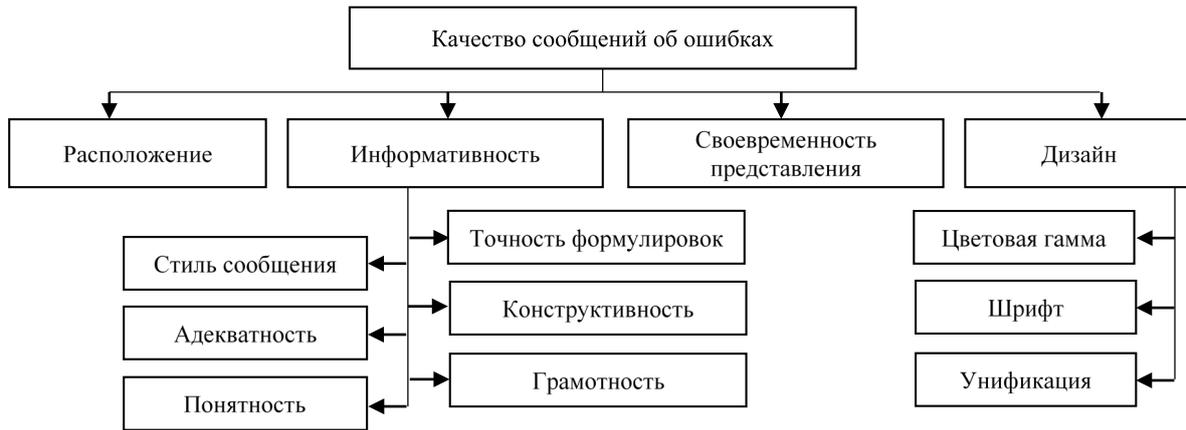


Рис. 2

валидации определяется экспертным путем в ходе анализа АСУ. Чек-лист для определения качества системы валидации представлен в табл. 1.

Коэффициент качества рассчитывается по формуле

$$Q_{VS} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m q_j,$$

где  $q_j$  – полученная оценка по  $j$ -му требованию;  $m$  – количество применяемых требований.

**Качество сообщений об ошибках ( $Q_{EM}$ ).**

Сообщения об ошибках – это важная часть информационной поддержки оператора при выполнении им своей рабочей деятельности. Их качество достаточно сильно влияет на общую удовлетворенность оператора системой, на эффективность его работы в части исправления и предотвращения ошибок. Структура качества сообщений об ошибках представлена на рис. 2.

Формально модель качества сообщений об ошибках описывается следующим множеством:

$$\{Q_{EM}\} = \{k_{LEM}, \{Q_{ICEM}\}, k_{TSEM}, \{Q_{DEM}\}\},$$

где  $k_{LEM}$  – коэффициент качества расположения сообщений об ошибках. Все сообщения об ошибках должны находиться в фокусе внимания оператора;  $\{Q_{ICEM}\} = \{k_{MS}, k_A, k_U, k_{WA}, k_C, k_{lit}\}$  – множество параметров, описывающих качество информативности сообщений об ошибках:  $k_{MS}$  – коэффициент качества выбранного стиля сообщений (стиль сообщений должен быть деловым и вежливым);  $k_A$  – коэффициент качества адекватности сообщений об ошибке самой ошибке (сообщение об ошибке должно быть адекватно самой ошибке);  $k_U$  – коэффициент качества понят-

ности сообщения для оператора (необходимо использовать понятные, однозначные для оператора формулировки, краткие, но отражающие суть возникшей ошибки. Также сообщения должны содержать минимум технических кодов, в идеале – обходиться без них);  $k_{WA}$  – коэффициент качества точности используемых в сообщении формулировок (сообщения об ошибках должны точно описывать суть произошедшей ошибки);  $k_C$  – коэффициент качества конструктивности сообщений об ошибках (сообщения об ошибках должны предлагать определенные способы (решения) исправления возникшей ошибки, а также давать информацию о том, как избежать подобных ошибок в будущем);  $k_{lit}$  – коэффициент качества грамотности сообщений об ошибках (в сообщениях об ошибках недопустимы орфографические, грамматические и стилевые ошибки);  $k_{TSEM}$  – коэффициент качества своевременности представления сообщений об ошибках;  $\{Q_{DEM}\} = \{k_{CS}, k_F, k_{UEM}\}$  – множество параметров, описывающих качество дизайна сообщений об ошибках:  $k_{CS}$  – коэффициент качества выбранной цветовой гаммы для сообщений (сообщения об ошибках должны быть хорошо заметны на общем фоне и привлекать к себе внимание, но при этом их цветовая гамма должна сочетаться с общим дизайном ПО);  $k_F$  – коэффициент качества читаемости выбранного шрифта для сообщений (шрифт сообщений должен быть легко читаем и эффективно восприниматься оператором);  $k_{UEM}$  – коэффициент унификации представления сообщений об ошибках. Все сообщения об ошибках в пределах одной системы должны выглядеть одинаково.

**Качество деятельности оператора** ( $\{Q_{UA}\}$ ) множество, характеризующее непосредственно качество рабочей деятельности оператора, формально описывается следующим кортежем:

$$\{Q_{UA}\} = \{\{Q_{UAA}\}, k_C, k_T, L, Z\},$$

где  $\{Q_{UAA}\} = \{\overline{T}_T, \overline{T}_{IT}, \overline{T}_P, k_{AAA}, k_{FOS}, k_{FOO}, P_t, P_x\}$  – множество параметров, описывающих качество алгоритмов деятельности оператора:  $\overline{T}_T$  – среднее время выполнения задачи;  $\overline{T}_{IT}$ ,  $\overline{T}_P$  – среднее время выполнения задач с учетом их важности и вероятности их возникновения соответственно;  $k_{AAA}$  – коэффициент адекватности алгоритмов деятельности оператора выполняемым рабочим задачам и технологическому процессу;  $k_{FOS}$ ,  $k_{FOO}$  – коэффициенты рационального распределения функций между оператором и системой и между операторами;  $P_t$  – вероятность своевременного решения задачи управления;  $P_x$  – вероятность выполнения непрерывной деятельности с заданной точностью;  $k_C$ ,  $k_T$  – коэффициенты загрузки и напряженности оператора;  $L$  – показатель логической сложности деятельности;  $Z$  – нормированный показатель стереотипности.

На данный момент получение значений данных показателей сопряжено со следующими трудностями:

1. Методики расчета данных показателей, кроме временных, достаточно сложны.
2. Для разработчиков полученные значения показателей остаются непонятными, малоинформативными и, как следствие, практически не используются.

Для решения данных проблем предлагаются следующие методики для определения представленных параметров.

**Оценка временных показателей.** Среднее время выполнения задачи ( $\overline{T}_T$ ). Очень важный критерий эффективности деятельности оператора, особенно если к АСУ предъявляются жесткие временные требования и ограничения. Соответственно можно предположить, что коэффициент качества больше у того алгоритма деятельности, у которого меньше среднее время выполнения рабочей задачи.

Длительность выполнения задачи состоит из суммы длительностей восприятия информации, обработки и принятия пользователем решения,

действий пользователя и реакции системы на действия пользователя. Оценивать данный параметр предлагается с помощью модифицированного метода GOMS (Goals, Operators, Methods, and Selection Rules – цели, операторы, методы и правила их выбора) совместно с законами Хика и Фитса, описанными далее, а также экспериментальным путем.

Метод GOMS, предложенный в 1983 г. С. К. Кардом, Т. П. Мораном и А. Ньюэллом [2], заключается в представлении алгоритма решения задачи с помощью базовых операторов (табл. 2).

Таблица 2

Оператор	Время	Описание
<i>K</i>	0.2	Время, необходимое для нажатия клавиши клавиатуры
<i>P</i>	1.1	Время, необходимое для перемещения указателя мыши к определенной позиции на мониторе
<i>H</i>	0.4	Время, необходимое для перемещения руки пользователя с клавиатуры на мышь
<i>M</i>	1.35	Ментальная пауза, т. е. время, необходимое пользователю на обдумывание следующего шага

Очевидно, что данных базовых элементов недостаточно для описания сложных алгоритмов деятельности, к тому же подобные расчеты будут достаточно грубыми. В связи с этим предлагается расширить базовый набор элементов, используя операторы и их временные значения, полученные Б. Ф. Ломовым [3] и адаптированные под современные информационные технологии (табл. 3).

*Замечания:*

1. Для операторов *F* и *L* были взяты средние значения для сложных пультов управления, поскольку на данный момент все АСУ сложны по уровню и объему предъявляемой оператору информации, а также по решаемым рабочим задачам.

2. Для уточнения времени, затрачиваемого оператором на перемещение указателя манипулятора от одной точки до другой (оператор *P*), необходимо использовать закон Фитса [2]. Необходимость уточнять данное значение может быть вызвана использованием в АСУ нескольких дисплеев.

3. Для уточнения времени, затрачиваемого оператором на выбор одной альтернативы из нескольких (оператор *L*), необходимо использовать закон Хика [2].

Таблица 3

Оператор	Время, с	Описание
$K$	0.62	Нажатие клавиши. Время, необходимое для того, чтобы нажать клавишу с самоконтролем
$K'$	0.5	Нажатие клавиши. Время, необходимое для того, чтобы нажать клавишу без самоконтроля
$T(n)$	$K + 0.25 \cdot (n-1)$	Последовательность нажатий $n$ клавиш. Время, необходимое для того, чтобы нажать последовательно несколько ( $n$ ) клавиш с самоконтролем
$T'(n)$	$K' + 0.2 \cdot (n-1)$	Последовательность нажатий $n$ клавиш. Время, необходимое для того, чтобы нажать последовательно несколько ( $n$ ) клавиш без самоконтроля
$P$	1.1	Указание. Время, необходимое оператору для того, чтобы указать на какую-то позицию на экране монитора
$B$	0.1	Нажать/отпустить кнопку манипулятора. Время, необходимое пользователю, чтобы нажать или отпустить кнопку манипулятора
$BB$	0.2	Щелчок кнопкой манипулятора. Время, необходимое пользователю, чтобы сделать один щелчок манипулятором
$H$	0.4	Перемещение. Время, необходимое пользователю для того, чтобы переместить руку с клавиатуры на манипулятор или с манипулятора на клавиатуру
$M$	1.2	Ментальная подготовка. Время, необходимое пользователю для того, чтобы умственно подготовиться к следующему шагу
$W(t)$	0.1	Обратная связь. Время, в течение которого пользователь должен ожидать ответ ПО
$F$	10	Поиск, восприятие и декодирование информации
$L$	7.5	Принятие решения
$R$	0.28	Фиксация объекта глазами на дисплее
$A$	$0.002 + 0.004\alpha$	Перемещение взгляда на $\alpha^\circ$

**Закон Фитса** гласит, что время достижения заданного объекта прямо пропорционально дистанции до объекта и обратно пропорционально размеру объекта; таким образом, чем дальше расположен объект, тем дольше мы будем до него добираться, или чем меньше объект, тем больше времени нам потребуется для того что бы достичь его [2].

В одномерном случае, закономерность выглядит следующим образом:

$$T = a + b \log_2 \left( \frac{D}{S} + 1 \right),$$

где  $T$  – среднее время в мс, потраченное, чтобы закончить движение;  $a$  – среднее время начала/конца движения;  $b$  – величина, зависящая от типичной скорости работы;  $D$  – дистанция от точки старта до центра объекта;  $S$  – ширина объекта, измеренная вдоль траектории движения курсора.

Константы  $a$  и  $b$  могут быть установлены экспериментально по параметрам производительности оператора или введены на основе мнений экспертов.

**Ограничение:** данный закон работает только при следующих условиях:

- соотношение между движением манипулятора и курсором линейно;
- перемещение непрерывно.

**Закон Хика.** Если для совершения какого-либо действия оператор должен выбрать объект

или действие из имеющихся альтернатив, то время, затраченное на выбор одного из  $n$  вариантов, пропорционально двоичному логарифму числа вариантов, увеличенного на единицу, при условии, что все варианты равновероятны [2]:

$$T = a + b \log_2 (n + 1),$$

где  $T$  – среднее время выбора одной альтернативы мс;  $n$  – количество альтернатив;  $a$  и  $b$  – константы, которые описывают индивидуальные особенности восприятия оператора – задержку перед выполнением задания, индивидуальный коэффициент скорости принятия решения и т. п.

Если альтернативы представлены без какой-либо системы, понятной оператору, то коэффициенты  $a$  и  $b$  возрастают. Наличие у оператора навыков работы с системой снижает значение коэффициента  $b$ . При использовании любых положительных значений  $a$  и  $b$  из закона Хика следует, что предоставление оператору одновременно нескольких альтернатив обычно более эффективно, чем организация тех же альтернатив в иерархические группы [2].

Если известны вероятности выбора каждой из альтернатив –  $p_i$ , то выражение примет вид:

$$T = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 \left( \frac{1}{p_i} + 1 \right).$$

*Замечания:*

1. Закон Фитса обязательно применять для расчета временных показателей при разработке (экспертизе) АСУ, в которых используют несколько систем отображения информации (СОИ).

2. Закон Хика обязательно применять для расчета временных показателей при разработке (экспертизе) сложных алгоритмов деятельности (АД) оператора, требующих большого числа принятия решений.

На более поздних этапах создания АСУ кроме оценки времени выполнения каждой из поставленных задач можно с помощью обобщенного структурного метода [4] оценить также и вероятности безошибочного решения задач.

Рассмотрим возможную информацию и ее использование при оценке различных вариантов пользовательского интерфейса (ПИ) программного обеспечения (ПО) ПИ ПО АСУ. Предварительно введем следующие обозначения:  $s_1, s_2, \dots, s_n \in S$  – множество задач, которые могут быть поставлены перед пользователем;  $a_1, a_2, \dots, a_n \in A$  – множество ПИ ПО АСУ, которые могут быть использованы для решения всего комплекса перечисленных задач (предполагая, что используемый интерфейс однозначно определяет АД оператора);  $t_{ij}$  – среднее время решения задачи  $s_i$  с использованием ПИ  $a_j$  (соответствующие значения  $t_{ij}$  могут быть получены вышепредставленным способом или с помощью эксперимента);  $p_{ij}$  – вероятность безошибочного решения задачи  $s_i$  с использованием ПИ  $a_j$ ;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – интенсивность потоков соответствующих задач;  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  – важность задач  $s_1, s_2, \dots, s_n$  соответственно.

Для оценки различных вариантов ПИ ПО АСУ и, следовательно, комплексного решения задачи по предъявлению информации и обработке АД оператора предлагается следующий подход:

1. На стадии эскизного проекта имеется информация только по среднему времени выполнения задач, полученная с помощью вышепредставленной методики. По этой информации можно выделить группу ПИ, которые могут быть заранее исключены из рассмотрения. Это можно осуществить, сравнивая векторы  $\bar{t}_j = (t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{nj})$ , либо выделяя множество Парето и оставляя соответствующие ПИ для последующего анализа,

либо посредством сворачивания, т. е. получения сумм соответствующих общих времен работы пользователя по каждому из рассматриваемых вариантов ПИ:

$$T_j = \sum_{i=1}^n t_{ij}.$$

Таким образом, после стадии эскизного проекта остается множество вариантов ПИ  $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m_1} \in A_1 \subseteq A, m_1 \leq m$ , где  $m$  – количество вариантов ПИ.

2. На стадии технического проекта уже может появиться следующая дополнительная информация:

– вероятности  $p_{ij}$  безошибочного решения задачи  $s_i$  с использованием ПИ  $a_j$ , полученные расчетным способом (например, с использованием обобщенного структурного метода) по имеющимся данным;

– значения компонентов векторов важностей задач  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ ;

– интенсивности (частоты) возникновения необходимости решения задач  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ .

Несмотря на то что эта информация может быть весьма приближенной – полученной по не совсем точным данным  $p_{ij}, j = 1, 2, \dots, m_1$  – или просто экспертной (векторы  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  и  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ), она может послужить для следующего сокращения множества приемлемых вариантов ПИ. Оно может быть реализовано либо посредством решения многокритериальной задачи выбора оптимального ПИ, хотя на этом этапе такое решение носит весьма приближенный характер, либо вычислением различных сверток. В качестве таких сверток можно предложить:

1) для оценки времени (быстродействия работы с конкретным интерфейсом):

– среднее время выполнения задачи с использованием конкретного варианта ПИ с учетом интенсивности (частоты) их возникновения

$$\hat{T}_j = \sum_{i=1}^n \lambda_i t_{ij} / \sum_{i=1}^n \lambda_i, j \in A_1, ;$$

– среднее время выполнения задачи с использованием конкретного варианта ПИ с учетом их важности и интенсивности (частоты) их возникновения

$$\hat{T}_j = \sum_{i=1}^n \lambda_i \alpha_i t_{ij} / \sum_{i=1}^n \lambda_i \alpha_i, \quad j \in A_1;$$

2) для оценки вероятности безошибочного выполнения:

– вероятность безошибочного решения средней задачи с использованием конкретного варианта ПИ с учетом интенсивности (частоты) их возникновения:

$$\hat{p}_j = \left( \prod_{i=1}^n p_{ij}^{\lambda_i} \right)^{1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad j \in A_1,$$

– среднее время выполнения задачи с использованием конкретного варианта ПИ, учитывая их важность и интенсивность (частоту) их возникновения:

$$\hat{p}_j = \left( \prod_{i=1}^n p_{ij}^{\lambda_i \alpha_i} \right)^{1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i \alpha_i}, \quad j \in A_1.$$

Полученный набор векторов  $\tilde{T}_j, \hat{T}_j, \tilde{p}_j, \hat{p}_j$  ( $j \in A_1$ ) может, в свою очередь, служить для сокращения множества возможных вариантов ПИ до некоторого множества  $A_2$ . Уточнение исходных данных в процессе проектирования ПИ позволит уточнять полученные оценки и постепенно сокращать множество приемлемых ПИ. При этом не исключено влияние на принятие решения комплекса неформализуемых факторов, которые ранее не были приняты во внимание.

**Коэффициент загруженности оператора** ( $k_C$ ). Данный коэффициент характеризует среднее время, затрачиваемое оператором непосредственно на выполнение поставленных рабочих задач, включая исправление ошибок. Значение коэффициента загруженности  $k_C$  рассчитывается по формуле

$$k_C = \frac{t_{DP}}{t_W},$$

где  $t_{DP}$  – общее время затрачиваемое оператором на выполнение поставленных рабочих задач;  $t_W$  – общее время работы оператора.

При совместной деятельности коэффициент загруженности  $k_C$  рассчитывается по формуле

$$k_C = \frac{t_{DP} + t_{IO}}{t_W},$$

где  $t_{IO}$  – время взаимодействия оператора с коллегами.

Предельно допустимое значение данного показателя равно 0.75. При большем значении оператор будет перегружен работой, и, следовательно, эффективность АСУ будет низкой, а вероятность возникновения ошибок достаточно высокой.

*Замечание:* при коэффициенте загрузки, меньше или равном 0.2, наступает состояние недогрузки оператора, что также приводит к утомлению оператора и росту вероятности возникновения ошибок. При этом состояние недогрузки оператора более критично для эффективности работы АСУ, так как оператор может пропустить экстремальную ситуацию и не успеть среагировать на нее.

**Коэффициент напряженности оператора** ( $k_T$ ). Данный коэффициент зависит от коэффициентов темповой ( $k_{TT}$ ) и эмоциональной ( $k_{ET}$ ) напряженности:

$$k_T = k_{TT} k_{ET}.$$

Темповая напряженность характеризует психологическую напряженность оператора, возникающую у него из-за дефицита времени на выполнение рабочих задач и рассчитывается по формуле [5]

$$k_{TT} = \frac{T_{\text{вып}}}{T},$$

где  $T_{\text{вып}}$  – среднее время выполнения рабочей задачи;  $T$  – имеющееся время на выполнение рабочей задачи.

Предельно допустимое значение данного показателя равно 0.8, при  $0.7 \leq k_{TT} < 0.8$  деятельность считается очень тяжелой.

Коэффициент эмоциональной напряженности характеризует степень ответственности за результат собственной деятельности, т. е. значимость ошибки при выполнении трудовой деятельности, и указывает, в какой мере оператор может влиять на результат собственного труда при различных уровнях сложности осуществляемой им деятельности. С возрастанием сложности повышается степень ответственности, поскольку ошибочные действия приводят к дополнительным усилиям со стороны оператора или целого коллектива, что, соответственно, приводит к увеличению эмоционального напряжения.

Коэффициент эмоциональной напряженности рассчитывается по формуле [6]

$$k_{\text{ЕТ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (b_i + c_i) P_i,$$

где  $b_i$  – показатель степени срочности  $i$ -й работы, определяемый по табл. 4 при проведении оценки;  $c_i$  – показатель значимости ошибки, если она будет допущена при выполнении  $i$ -й работы, определяемый по табл. 5;  $P_i$  – частота  $i$ -го вида работы.

Таблица 4

Степень срочности работы в баллах	Характеристика
0	Оставшегося времени достаточно для выполнения всех операций
1	Оставшегося времени достаточно только для выполнения существенных операций
2	Оставшегося времени недостаточно даже для выполнения существенных операций

Таблица 5

Значимость ошибки в баллах	Характеристика
0	Ошибка обнаруживается и устраняется самим работником
1	Ошибка обнаруживается и устраняется с участием вышестоящего руководства
2	Ошибка устраняется за счет дополнительных усилий коллектива
3	Ошибка влечет за собой повреждение оборудования или финансовые потери

Так как коэффициент эмоциональной напряженности, определяемый данным способом, находится в пределах  $[0.2; 2]$ , то для вычисления коэффициента напряженности оператора он должен быть нормирован.

*Замечание:* данная методика оценки эмоциональной напряженности достаточно приближительная и не учитывает личностные психологические особенности оператора. Реальное значение возникающей эмоциональной напряженности деятельности объективно может быть оценено только на основе постоянного измерения изменений различных физиологических параметров – давления, кожно-гальванической реакции, частоты пульса и др. [4]–[7]. Однако подобные методы уже сами по себе создают некоторую напряженность для оператора, отвлекая его от работы присутствием датчиков, с которыми он вынужден

мириться, а значит, такие методы непригодны при оценке качества деятельности оператора и опосредованно – качества АСУ. Кроме этого, в подавляющем большинстве случаев отсутствует информация о том, какие значения показателей нормальны для данного оператора, поэтому в тех случаях, когда речь идет о влиянии АСУ на напряженность деятельности, необходимо использовать субъективную оценку самим оператором напряженности его деятельности [8].

Введем следующие обозначения:  $\mu(t) \geq 0$  – мгновенное значение напряженности деятельности;  $M(t_1, t_2)$  – интегральное значение эмоциональной напряженности на интервале  $[a, b]$ ; тогда

$$M(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \mu(t) dt;$$

$m(t_1, t_2)$  – среднее значение эмоциональной напряженности на интервале  $[a, b]$ :

$$m(a, b) = \frac{M(a, b)}{b - a} = \frac{\int_a^b \mu(t) dt}{b - a}.$$

Отсюда следует  $M(t_1, t_2) = (t_2 - t_1) \cdot m(t_2, t_1)$ . Из определения интегрального значения напряженности следует, что функция  $M(X, Y)$  является аддитивной, т. е. выполняется соотношение  $M(X, Z) = M(X, Y) + M(Y, Z)$ , где  $X < Y < Z$ . Тогда выполняется равенство

$$m(X, Z) = \frac{(y - x)m(x, y) + (z - y)m(y, z)}{z - x},$$

которое позволяет оценивать такую важную характеристику деятельности, как среднее значение эмоциональной напряженности оператора при выполнении некоторого алгоритма (при решении конкретной задачи).

*Замечание:* хотя истинное значение напряженности деятельности неизвестно, но ее субъективная оценка оператором в конкретные моменты времени может быть как пессимистической, так и оптимистической, т. е. зависит от эмоционального состояния оператора [6], [8].

**Показатели логической сложности и стереотипности алгоритмов деятельности ( $L, Z$ ).** Одной из особенностей оценки показателей логи-

ческой сложности и стереотипности на этапе проектирования служит тот факт, что оценивать их приходится на основании описания алгоритмов деятельности (АД) операторов, так как на ранних этапах проектирования еще нет реальной системы. Под описанием АД при этом понимают руководства (инструкции) оператору, регламентирующие порядок решения конкретных задач.

Согласно ГОСТ В 29.04.002–84 АД оператора по показателям стереотипности ( $Z$ ) и логической сложности ( $L$ ) должны соответствовать следующим значениям:  $0.25 \leq Z \leq 0.85$  и  $L \leq 0.2$ . Максимального значения показатель стереотипности достигает в условиях, когда последовательность действий оператора строго детерминирована и не зависит ни от каких условий. При  $Z$  более 0.9 операторская деятельность должна быть автоматизирована таким образом, чтобы большая часть функций, выполняемых им, была возложена на АСУ.

В [9] предложен упрощенный подход по оценке данных показателей.

Показатель  $Z$  оценивается по наличию в АД непрерывных последовательных действий без логических условий и вычисляется по формуле

$$Z = \frac{1}{N' + 1} \sum_{i=1}^k \frac{m_{0i}^2}{M_i} = \sum_{i=1}^k \left( \frac{m_{0i}}{M_i} \right)^2 \frac{M_i}{N' + 1} = \sum_{i=1}^k \left( \frac{m_{0i}}{M_i} \right)^2 \frac{M_i}{\sum_{i=1}^k M_i},$$

где  $N'$  – общее количество элементарных операций и логических условий;  $m_{0i}$  – число элементарных операций в  $i$ -й комплексной группе;  $M_i$  – общее число элементарных операций и логических условий в  $i$ -й комплексной группе;  $k$  – число непрерывных групп элементарных операций в АД.

Показатель  $L$  дает оценку динамической деятельности оператора и зависит от числа и длины групп логических условий. Значение показателя  $L$  вычисляют по формуле

$$L = \frac{1}{N' + 1} \sum_{j=1}^m \frac{m_{lj}^2}{m_j} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{m_{lj}}{m_j} \right)^2 \frac{m_j}{N' + 1} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{m_{lj}}{m_j} \right)^2 \frac{m_j}{\sum_{j=1}^m m_j},$$

где  $N'$  – общее количество элементарных операций и логических условий, начиная с первого логического условия;  $m$  – число непрерывных логических условий в АД;  $m_{lj}$  – число логических условий в  $j$ -й комплексной группе;  $m_j$  – число элементарных операций и логических условий в  $j$ -й комплексной группе.

При этом необходимо заметить, что выполняются следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^k M_i = \sum_{j=1}^m m_j = N' + 1, \quad k = m.$$

Апробация представленного комплекса параметров показала, что показатели, входящие в него, в большинстве случаев достаточны для оценки качества рабочей деятельности оператора при его взаимодействии с АСУ. Таким образом, комплекс может быть использован как методологический базис при проведении эргономической экспертизы современных АСУ, при анализе алгоритмов деятельности операторов, а также при создании системы информационной поддержки разработчиков АСУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснова А. И., Назаренко Н. А., Падерно П. И. Человеческий фактор в информационных системах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008.
2. Раскин Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем / пер. с англ. СПб.: Символ-Плюс, 2010.
3. Справочник по инженерной психологии / под ред. Б. Ф. Ломова. М.: Машиностроение, 1982.
4. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л.: Наука, Ленингр. отд. 1982.
5. Львов В. М. Человеко-ориентированные технологии создания и экспертизы автоматизированных систем: учеб. пособие. Тверь: ООО «Издательство „Триада“», 2005.
6. Суходольский Г. В. Основы психологической теории деятельности. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.

7. Ломов Б. Ф., Васильев А. А., Офицеров В. В. Военная инженерная психология. М.: Воениздат, 1970.

8. Балхарет А. А. С., Падерно П. И. Автоматизация оценки напряженности деятельности оператора // Науч.-практ. журн. «Биотехносфера». 2009. № 2 (2). С. 53–56.

9. Назаренко Н. А., Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Способ оценки логической сложности и стереотипности алгоритмов деятельности операторов // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 4. С. 740–746.

---

N. A. Nazarenko  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## ASSESSMENT OF QUALITY OF INTERACTION OF OPERATORS WITH AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

*A model of the ergonomic quality of the operator's interaction with the automated control system (ACS), as well as a set of calculation expressions for evaluating the parameters included in the model, are presented. A feature of the model and complex is the ease of use and the minimum parameters necessary for analyzing the activities of ACS operators. The model is presented both graphically and using tuples. The presented results can be used as a methodological basis for information support of developers of complex systems and complexes, as well as in the analysis of the work activities of various types of operators.*

**Automated control systems, operator interaction quality, activity algorithms, congestion coefficient, tension coefficient, logical complexity indicator, stereotypical indicator, quality of information support, assessment of time indicators**

---

УДК 004.94

К. АТТО, Е. Е. Котова  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Моделирование коммуникативных стратегий в интеллектуальной среде обучения

*Анализ текущего состояния систем LMS показывает, что при их внедрении в большие образовательные организации могут возникать проблемы, связанные в первую очередь с падением качества образовательной услуги. Использование CRM и интеллектуальных агентов позволяет улучшить качество образовательного процесса с точки зрения своевременного реагирования и полноты ответов на запросы учащихся. Моделирование стратегии коммуникации в электронной среде обучения позволит оценить, насколько интеллектуальные методы обработки данных могут повысить эффективность учебного процесса. Для этого рассматриваются три поколения организации учебного процесса: классическое образование, смешанное и с применением интеллектуальных методов поддержки студентов. Далее на основе предлагаемой модели коммуникации в электронной среде обучения в среде динамического моделирования Simulink строится модель системы массового обслуживания, на основе которой происходит расчет относительных временных затрат образовательной организации в цепочке «тестирование студентов – оценка результатов – персональные рекомендации».*

**Системы управления обучением, коммуникативные стратегии, моделирование, среда обучения**

Предыдущие исследования среды электронного обучения показали, что переход от классической модели обучения может вызвать проблемы при взаимодействия участников учебного процесса. Некоторые инструменты, например система управления

взаимоотношениями с клиентами (Customer Relationship Management, CRM) и интеллектуальные агенты, могут снизить негативное влияние в долгосрочной перспективе.