

УДК 007.3

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

Модель процесса проектирования алгоритмов деятельности операторов

Проведен анализ процесса проектирования алгоритмов деятельности операторов. Проработан комплекс вопросов, связанных с построением базового алгоритма деятельности оператора разработчиком информационно-управляющих человеко-машинных систем. Предложен комплекс подходов и методов для повышения качества разработанного алгоритма деятельности (повышение вероятности безошибочного выполнения) при наличии ограничений на время выполнения. Модель представлена в виде, позволяющем упростить автоматизацию решения поставленных задач. Представленные результаты положены в основу проектируемого информационного модуля поддержки деятельности разработчика информационно-управляющих человеко-машинных систем при решении задач, связанных с проектированием и оценкой алгоритмов деятельности операторов разрабатываемых сложных человеко-машинных систем и комплексов различного назначения.

Алгоритм деятельности, оператор, проектирование алгоритмов деятельности, информационно-управляющие человеко-машинные системы

На ранних этапах проектирования сложных информационно-управляющих человеко-машинных систем (ИУ ЧМС) различного назначения перед разработчиком, в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 29.00.002, возникает задача проектирования алгоритмов деятельности (АД) операторов. Необходимость решения задачи проектирования АД операторов на этапе эскизного проекта (ЭП) обусловлена, кроме всего прочего, тем, что на построенных АД на последующих этапах будет основано решение таких организационных и технических задач, как определение численности и квалификации операторов, распределение функций между ними, создание пользовательского интерфейса, разработка пультов управления и размещения систем отображения информации и т. п.

Для этапа ЭП разработки современных ИУ ЧМС, особенно принципиально новых или использующих новые информационные технологии обработки и представления информации, характерно отсутствие достаточно четких представлений и знаний об организации дискретных алгоритмов деятельности (АД) операторов, т. е. о порядке следования и особенностях выполнения отдельных операций [1], [2]. При этом может существовать некая общая (нечеткая) исходная информация, основанная либо на мнениях отдель-

ных специалистов (экспертов), либо на опыте проектирования и/или эксплуатации аналогичных или похожих ИУ ЧМС (например, «операцию X следует выполнять до операции Y»).

Укрупненно процесс проектирования АД оператора можно разбить на стадии, представленные на рис. 1.

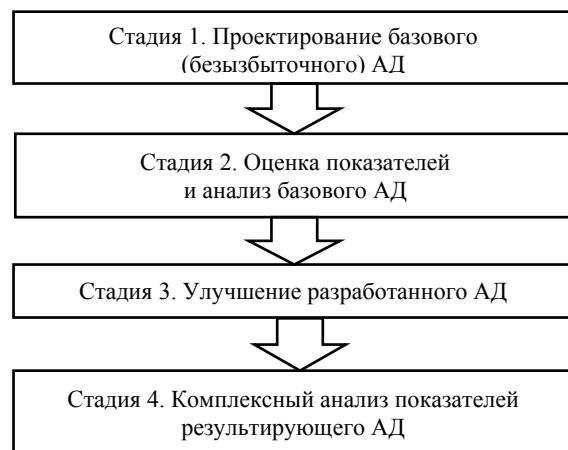


Рис. 1

Каждая из стадий, в свою очередь, состоит из нескольких этапов. В процессе разработки алгоритма принимают участие как непосредственные разработчики ИУ ЧМС, так и приглашаемые эксперты, в качестве которых могут выступать, например, операторы (бывшие операторы, экс-

плуатанты и др.), имеющие опыт работы с аналогичными или похожими системами. Под разработчиком будем понимать как некоего индивидуума, так и коллектив, занимающийся проблемой построения АД оператора.

Обозначения: P – разработчик; P_i – разработчик на i-м этапе проектирования АД оператора; Э – эксперт; Э_i – эксперт, взаимодействующий с разработчиком на i-м этапе проектирования АД оператора; O – описание действий оператора при решении некоторой задачи; O_i – описание действий оператора при решении некоторой задачи, представляемое разработчиком на i-м этапе проектирования; И – инструкция оператору; И_i – инструкция оператору представляемая разработчиком на i-м этапе проектирования АД оператора.

Стадия 1. Проектирование базового (безызбыточного) АД оператора. *Этап 1.* Разработчик уточняет требования к АД, для того чтобы определить, к какому классу относится проектируемый АД. После этого разработчик на основании своих представлений о деятельности оператора, собственного опыта, изученной литературы и интервью (бесед) с коллегами разрабатывает первоначальное (возможно, весьма расплывчатое) описание (O₁) последовательности действий будущего оператора при решении некоторой задачи.

Понимая, что это описание пока весьма приблизительно отражает лишь отдельные аспекты работы будущего оператора, разработчик решает обратиться к специалисту (Э₁), которого он полагает, во-первых, более сведущим в этой области вопроса, во-вторых, более доступным для беседы со слабо знающим проблемную область человеком. Для интервью (беседы) с Э₁ разработчик готовит предварительное описание АД, (и, может быть, некоторые наброски инструкции оператору), а также формулирует вопросы.

Результатом первого взаимодействия P₁ и Э₁ станет в лучшем случае полученная P₁ дополнительная информация I₁⁺.

Формально этот процесс представлен на рис. 2.

Одной из особенностей полученной информации является тот факт, что выражение I₁ + I₁⁺

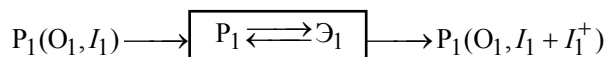
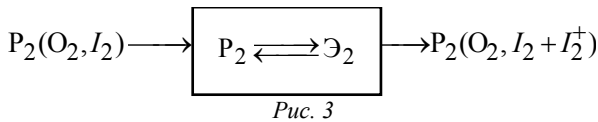


Рис. 2

не следует трактовать (понимать) буквально как простую сумму (информации или знаний) $I_1 + I_1^+ \neq I_1 \cup I_1^+$, так как полученная от Э₀ дополнительная информация I₁⁺ может частично вытеснить какую-либо информацию из имевшейся ранее $I_1 \not\subset I_1 + I_1^+$, а то и полностью ее заменить $I_1 \cap (I_1 + I_1^+) = \emptyset$. При этом в ряде случаев следует различать полученную от эксперта информацию I₁⁺ и усвоенную (переработанную в сознании разработчика) эту же информацию \tilde{I}_1^+ . Соотношение полученной и усвоенной разработчиком информации может меняться от полного непонимания (невосприятия) – $I_1^+ \cap \tilde{I}_1^+ = \emptyset \rightarrow I_1^+ \cap (I_1 + \tilde{I}_1^+) = \emptyset$, до творческого развития – $I_1^+ \subset \tilde{I}_1^+ \subset (I_1 + \tilde{I}_1^+)$ полученной информации.

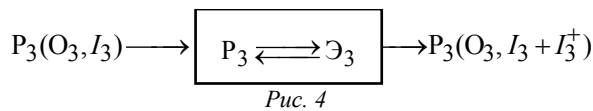
Этап 2. Разработчик (P₂) на основании полученной и обработанной (в его понимании) информации I₁ + \tilde{I}_1^+ , а также возможных консультаций с коллегами (информация I₂) корректирует собственные представления о деятельности оператора и ее особенностях, формируя свое понимание ($I_2 = I_1 + \tilde{I}_1^+ + \tilde{I}_2$). P₂ модифицирует предыдущее описание АД (O₁) в новое описание последовательности действий оператора O₂. Разработчик понимает, что он мог что-то упустить из полученной информации и пояснений или неправильно их понять, и поэтому ему следует обратиться еще раз к тому же специалисту (Э₂, Э₂ = Э₁) уже с новым описанием АД и другими (уточняющими) вопросами.

Не считая возможных организационных трудностей в обеспечении взаимодействия с экспертом, разработчик уже может общаться с ним на его языке, по крайней мере, понимая, что эксперт говорит. При этом необходимо заметить, что, несмотря на аналогичное представление взаимодействия разработчика и эксперта на этом этапе (рис. 3), смысловое наполнение этого взаимодействия меняется и становится значительно более конструктивным. Результатом взаимодействия P₂ и Э₂ становится, как и в предыдущем случае, дополнительная информация I₂⁺, полученная от эксперта.



Замечание: на этапе 2 стадии 1 ввиду повышения уровня профессионализма разработчика, а также улучшения конструктивности общения разработчика с экспертом невосприятие (непонимание) информации, получаемой от эксперта, становится невозможным, т. е. становится невозможной ситуация $I_2^+ \cap \tilde{I}_2^+ = \emptyset$, $I_2^+ \cap (I_2 + \tilde{I}_2^+) = \emptyset$.

Этап 3. Разработчик (P_3), на основании уже имевшейся I_2 , а также полученной (I_2^+) и переработанной (\tilde{I}_2^+) им информации, учитывая возможную дополнительную консультационную информацию I_3' , еще раз корректирует собственные представления об особенностях АД оператора, формируя свое понимание ($I_3 = I_2 + \tilde{I}_2^+ + I_3'$). P_3 меняет предыдущее описание АД (O_2) на новое описание АД оператора (O_3). Разработчик понимает, что, несмотря на свой возросший уровень компетентности в данной проблемной области, он все-таки мог что-то упустить при создании O_3 – последней (текущей) версии описания АД оператора, и поэтому ему следует обратиться к какому-либо другому независимому эксперту E_3 для получения окончательной консультации. Разработчик уже вполне владеет профессиональным языком и отчетливо понимает эксперта. В качестве независимого эксперта E_3 на этом этапе целесообразно привлечь кого-либо из специалистов, осуществляющих переподготовку операторов аналогичных ИУ ЧМС, обладающих знанием не только достоинств и недостатков самих систем и АД оператора, но и типовых недостатков операторов, в том числе типичных ошибок в их деятельности. Результатом взаимодействия P_3 и E_3 (рис. 4) становится, как и в предыдущих случаях, дополнительная информация.



Этап 4. Разработчик (P_4) на основании информации $I_3 + I_3' + \tilde{I}_3^+$ и, возможно, полученной дополнительно в ходе консультаций информации I_4' окончательно корректирует свои представления об особенностях АД оператора

($I_4 = I_3 + \tilde{I}_3^+ + I_4'$). P_4 исправляет предыдущее описание АД (O_3) на новое (O_4), которое и становится базовым АД оператора ИУ ЧМС.

Замечание: полученный базовый АД в дальнейшем может корректироваться.

Стадия 1 считается законченной. Работа по построению АД переходит на стадию 2.

Стадия 2. Оценка показателей и анализ базового АД оператора. Этап 5. Получение оценок. Для реализации оценки некоторых показателей полученного базового АД оператора разработчик должен его предварительно формализовать. Поскольку базовый АД имеет линейную (последовательную) структуру, то его формальное описание не представляет особой сложности.

Ввиду линейности структуры базового АД оператора:

- для оценки среднего (идеального) времени выполнения АД ($T_{ид}$) можно воспользоваться методом GOMS [3], но целесообразно использовать его модификацию, описанную в [4], что повысит точность получаемых временных характеристик;

- для оценки вероятности безошибочного выполнения АД ($\beta_{АД}^1$) можно использовать прямое произведение вероятностей безошибочного выполнения всех операций и действий, входящих в АД, $\beta_{АД}^1 = \prod_i \beta_i^1$;

- для оценки нормированных показателей стереотипности (S) и логической сложности (L) следует использовать стандартный метод расчета [5]–[7] либо модифицированный метод, предложенный в [8].

Этап 6. Анализ базового АД. Анализ базового АД оператора реализуется разработчиком (возможно, с привлечением экспертов).

Проверяется выполнение неравенства $T_{ид} < T_{зад}$.

Невыполнение этого неравенства указывает на то, что даже при выполнении безызыточного АД оператор не укладывается в заданное время, что может быть обусловлено неудачным интерфейсом, неправильным распределением функций между оператором и информационно-программно-техническим комплексом и другими причинами. В этом случае в первую очередь следует устранить эти причины.

Если неравенство $T_{ид} < T_{зад}$ выполняется, то введем понятие временного резерва $T_{рез} = T_{зад} - T_{ид}$. Если временной резерв достаточно велик, то это указывает на достаточно широкие возможности по улучшению качества (безошибочности выполнения) базового АД за счет введения функциональной избыточности.

Проверяется выполнение неравенства $\beta_{АД}^1 > \beta_{зад}^1$.

Невыполнение этого неравенства указывает на то, что при выполнении безыбыточного АД, состоящего из последовательных операций, оператор не укладывается в заданные требования по безошибочности. Хотя этот факт может быть обусловлен различными причинами, при наличии достаточного резерва времени $T_{рез} = T_{зад} - T_{ид}$ он может быть устранен за счет введения функциональной избыточности (контрольных операций, изменения структуры АД и др.). Отсутствие временного резерва в этом случае потребует изменения части ранее использованных информационно-программно-технических решений.

Выполнение неравенства $\beta_{АД}^1 > \beta_{зад}^1$ указывает на хорошо спроектированный АД, а при наличии достаточного резерва времени $T_{рез} = T_{зад} - T_{ид}$ и на возможность значительного повышения качества (безошибочности выполнения) АД.

Проверяется выполнение неравенства $0.25 \leq S \leq 0.85$.

Невыполнение правой части этого неравенства, т. е. выполнение неравенства $S > 0.85$ указывает на неправильное распределение функций между оператором и информационно-программно-техническим комплексом и говорит о необходимости автоматизации рутинных функций, выполняемых оператором.

Проверяется выполнение неравенства $L \leq 0.2$.

Невыполнение этого неравенства указывает на перегрузку оператора логическими действиями, что может повлечь за собой резкое возраста-

ние усталости и психологическое неприятие этой деятельности.

По результатам выполнения стадии 2 принимаются соответствующие рекомендации.

Стадия 3. Улучшение качества АД. Этап 7. Реконструкция модели АД. Для улучшения показателя безошибочного выполнения АД необходимо введение в АД дополнительных операций – как контролирующих безошибочность выполнения базовых операций, так и исправляющих обнаруженные ошибки в работе оператора. Для реализации решения этой задачи метод GOMS уже не годится в силу ряда ограничений по работе с вероятностными моделями. Операционно-психологический [9] и структурно-алгоритмический [10] методы также не могут применяться. Таким образом, разработчик должен формализовать сформированное на предыдущих стадиях описание АД в виде типовых функциональных единиц (ТФЕ) обобщенного структурного метода [1], [11]. Это влечет за собой дополнительные требования к уровню квалификации разработчика или к необходимости привлечения к решению этой задачи сторонних специалистов. Само представление базового алгоритма в виде последовательно выполняемых рабочих операций A_1, A_2, \dots, A_n не представляет больших затруднений.

В качестве примера рассмотрим введение в некоторый фрагмент АД, состоящий из одной рабочей операции A :

- операции контроля (K_A) (рис. 5, а);
- операции контроля (K_A) и операции исправления ошибок в операции A (D_A) (рис. 5, б)

со следующими характеристиками:

- среднее время выполнения операции контроля – T_K , доработки – T_D ;
- вероятности безошибочного выполнения операции доработки – β_D^1 ;
- вероятности признания операции выполненной правильно (неправильно), если она выполнена верно K_A^{11} (K_A^{10});

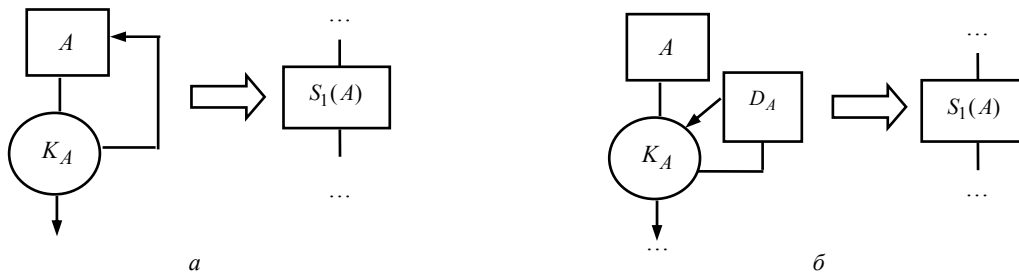


Рис. 5

– вероятности признания операции выполненной правильно (неправильно), если она выполнена неверно K_A^{01} (K_A^{00}).

Заметим, что вероятности K_A^{10} и K_A^{01} служат аналогами ошибок первого и второго рода, и, к тому же, выполняются следующие соотношения: $K_A^{11} + K_A^{10} = 1$, $K_A^{01} + K_A^{00} = 1$.

Введение только операции контроля (рис. 5, а) указывает на то, что оператору будет предоставлена некоторая информация (подсказка) о том, что операция A выполнена неверно и ее нужно повторить с самого начала.

Введение в рассматриваемый фрагмент АД операций контроля (K_A) и исправления ошибок (D_A) (рис. 5, б) указывает на то, что либо оператору будет предоставлена некоторая информация (подсказка) о том, что операция (комплекс операций) A выполнена неверно и ее следует исправить, после чего можно продолжать работу далее, либо реализуется автоматическое исправление ошибки, допущенной оператором.

При этом необходимо заметить, что и в том, и в другом случае контроль правильности выполнения операции повторяется до признания операции A выполненной правильно.

Укрупнение структур рис. 5, а и б происходит в соответствии с [1], [11] в укрупненные элементы S_1 и S_2 соответственно. Для укрупненных элементов S_1 и S_2 в [1], [11] приведены формулы оценки вероятностей их безошибочного выполнения и среднего времени их выполнения:

$$\beta_{S_1}^1(A) = \frac{\beta_A^1 K_A^{11}}{\beta_A^1 K_A^{11} + \beta_A^0 K_A^{01}} = \frac{\beta_A^1 K_A^{11}}{1 - (\beta_A^1 K_A^{10} + \beta_A^0 K_A^{00})}; \quad (1)$$

$$\beta_{S_2}^1(A) = \beta_A^1 K_A^{11} + (\beta_A^1 K_A^{10} + \beta_A^0 K_A^{00}) \times \frac{\beta_{D_A}^1 K_A^{11}}{\beta_{D_A}^1 K_A^{11} + \beta_{D_A}^0 K_A^{01}} = \beta_A^1 K_A^{11} +$$

$$+ (\beta_A^1 K_A^{10} + \beta_A^0 K_A^{00}) \frac{\beta_{D_A}^1 K_A^{11}}{1 - (\beta_{D_A}^1 K_A^{10} + \beta_{D_A}^0 K_A^{00})}; \quad (2)$$

$$T_{S_1}(A) = \frac{T_A + T_{K_A}}{\beta_A^1 K_A^{11} + \beta_A^0 K_A^{01}} = \frac{T_A + T_{K_A}}{1 - (\beta_A^1 K_A^{10} + \beta_A^0 K_A^{00})}; \quad (3)$$

$$T_{S_2}(A) = (\beta_A^1 K_A^{11} + \beta_A^0 K_A^{01})(T_A + T_K) + (\beta_A^1 K_A^{10} + \beta_A^0 K_A^{00}) \frac{T_D + T_K}{\beta_{D_A}^1 K_A^{11} + \beta_{D_A}^0 K_A^{01}}. \quad (4)$$

Формулы (1) и (2) понадобятся в дальнейшем для оценки вероятности безошибочного выполнения, а формулы (3) и (4) будут использованы для оценки резерва времени выполнения модифицированного АД в целом при введении избыточности (операции контроля или операций контроля и исправления (доработки)).

Значения показателей стереотипности (S) и логической сложности (L) меняются медленно и не поддаются хорошему прогнозу. Поэтому в процессе включения операций контроля и операций исправления ошибок в АД на два последних показателя внимания практически не обращают, а оценивают их только после окончания изменения структуры на последней стадии.

При изменении структуры АД (введении дополнительных операций по типу приведенных на рис. 5) необходимо постоянно отслеживать использование имеющегося резерва времени (желательно с учетом не только среднего времени их выполнения, но и соответствующих среднеквадратических отклонений для всех выполняемых операций, как базовых, так и вводимых в структуру АД).

Изменение резерва времени связано с возрастанием времени выполнения отдельных фрагментов АД при введении изменений, в том числе при включении дополнительных операций, в структуру АД.

Для оперативного отслеживания резерва времени выведем формулы возрастания времени для фрагментов, приведенных на рис. 5 (ΔT_{S_1} и ΔT_{S_2}):

$$\Delta T_{S_1}(A) = T_{S_1}(A) - T_A = \frac{T_A + T_{K_A}}{\beta_A^1 K_A^{11} + \beta_A^0 K_A^{01}} - T_A = \frac{(\beta_A^1 K_A^{10} + \beta_A^0 K_A^{00})T_A + T_{K_A}}{\beta_A^1 K_A^{11} + \beta_A^0 K_A^{01}} \quad (5)$$

$$\Delta T_{S_2}(A) = T_{S_2}(A) - T_A = T_A + T_{K_A} + (\beta_A^1 K_A^{11} + \beta_A^0 K_A^{00}) \frac{T_{D_A} + T_{K_A}}{\beta_{D_A}^1 K_A^{11} + \beta_{D_A}^0 K_A^{01}} - T_A = T_{K_A} + (\beta_A^1 K_A^{11} + \beta_A^0 K_A^{00}) \frac{T_{D_A} + T_{K_A}}{\beta_{D_A}^1 K_A^{11} + \beta_{D_A}^0 K_A^{01}}. \quad (6)$$

Замечания. 1. Необходимо принимать во внимание тот факт, что в реальном АД операции контроля правильности выполнения опе-

рации A (K_A) для случаев, приведенных на рис. 5, могут быть различны как по своей физической сути и вариантам реализации, так и по значениям характеристик.

2. При включении операций контроля или операций контроля и исправления ошибок в структуру АД изменения претерпевает не только сама структура АД, но и его показатели. При этом безошибочность реализации АД возрастает, но и увеличивается время выполнения АД.

3. Основным ограничением при анализе и выборе путей совершенствования АД служит заданное время его выполнения $T_{\text{зад}}$ или, что то же самое, оставшийся к конкретному шагу совершенствования АД резерв времени $T_{\text{рез}}$.

Этап 8. Совершенствование АД. Под совершенствованием АД, как уже было отмечено, разработчик (заказчик) понимает максимизацию вероятности безошибочного выполнения преобразованного АД при соблюдении ограничений, задаваемых на время его выполнения ($T_{\text{зад}}$), а также на значения нормированных показателей стереотипности (S) и логической сложности (L).

Кроме того, следует отметить, что время выполнения базового АД ($T_{\text{ид}}$), полученное в результате использования метода GOMS, является расчетным (идеальным) и не учитывает возможности (вероятности) того, что оператор в это время не уложится. Время $T_{\text{ид}}$ есть не что иное, как сумма времен выполнения базового набора операций A_1, A_2, \dots, A_n с учетом времени перехода от одной операции к другой, т. е. некоторая оценка времени выполнения всего АД в целом $T_{\text{ср}}$.

При решении задачи совершенствования АД по умолчанию будем предполагать, что для каждой из операций A_1, A_2, \dots, A_n , входящих в базовый АД, известны следующие характеристики:

– среднее время выполнения операции – T_i , $i = 1, 2, \dots, n$;

– среднее квадратическое отклонение времени выполнения операции – $\sigma_i(T)$, $i = 1, 2, \dots, n$;

– вероятность безошибочного выполнения операции – β_i^1 , $i = 1, 2, \dots, n$.

Рассмотрим несколько случаев выделения операций (фрагментов) с низкой безошибочностью (критических операций) и улучшения конкретных фрагментов.

1. *Имеется только одна критическая операция – A_j , безошибочность выполнения которой значительно меньше, чем безошибочность каждой из остальных операций, входящих в АД*
 $\beta_j^1 \ll \beta_i^1, i \neq j, i = 1, 2, \dots, n$.

В соответствии с (1), (2), (5), (6) вычислим значения $\beta_{S_1}^1(A_j)$ и $\beta_{S_2}^1(A_j)$; $\Delta T_{S_1}(A_j)$ и $\Delta T_{S_2}(A_j)$, а затем сравним их между собой.

Выполнение неравенств

$$\begin{aligned} \beta_{S_1}^1(A_j) &\geq \beta_{S_2}^1(A_j); \Delta T_{S_1}(A_j) \leq \Delta T_{S_2}(A_j); \\ \Delta T_{S_1}(A_j) &< T_{\text{рез}} = T_{\text{зад}} - T_{\text{ср}} \end{aligned} \quad (7)$$

свидетельствует о том, что вариант изменения фрагмента АД введением одного контроля с последующим повторением основной операции (вариант S_1) более выгоден (лучше), чем вариант S_2 , связанный с введением контроля и последующим исправлением допущенной ошибки ($S_1 > S_2$).

Выполнение неравенств

$$\begin{aligned} \beta_{S_1}^1(A_j) &\leq \beta_{S_2}^1(A_j), \Delta T_{S_1}(A_j) \geq \Delta T_{S_2}(A_j); \\ \Delta T_{S_1}(A_j) &< T_{\text{рез}} = T_{\text{зад}} - T_{\text{ср}} \end{aligned} \quad (8)$$

свидетельствует о том, что вариант изменения фрагмента АД введением контроля и последующего исправления допущенной ошибки (вариант S_2) более выгоден (лучше), чем вариант S_1 , связанный с введением только контроля с последующим повторением основной операции ($S_2 > S_1$).

Если ни одно из соотношений (7), (8) не выполняется, то сначала вычисляются только изменения времени выполнения АД, которые сравниваются с имеющим резервом времени. Если оба изменения времени выполнения рассматриваемого фрагмента меньше оставшегося резерва времени, т. е. выполняется соотношение:

$$(\Delta T_{S_1}(A_j) < T_{\text{рез}}) \wedge (\Delta T_{S_2}(A_j) < T_{\text{рез}}), \quad (9)$$

то выбор реализуется по большей вероятности безошибочного выполнения операции сравнением значений $\beta_{S_1}^1(A_j)$ и $\beta_{S_2}^1(A_j)$. Простота процедуры выбора в данном случае обеспечивается тем, что безошибочность выполнения единствен-

ной критической операции A_j значительно меньше, чем безошибочность каждой из остальных операций ($\beta_j^1 \ll \beta_i^1, i \neq j, i = 1, 2, \dots, n$), так как в этом случае остальные фрагменты АД в улучшении не нуждаются.

Если же безошибочность выполнения операции A_j просто меньше, чем безошибочность каждой из остальных операций, то это значит, что в АД могут быть и другие критические операции. Такой случай будет рассмотрен далее.

2. *Несколько одинаковых критических операций.* Пусть критическими являются операции $A_{i_1}, A_{i_2}, \dots, A_{i_k}$. То, что все критические операции одинаковы (однотипны), может свидетельствовать как о недоработке при создании пользовательского интерфейса, так и об ограниченных возможностях оператора (физических, психологических и др.) при выполнении конкретной операции (вида операций). Для всех операций следует реализовать единую стратегию: либо S_1 – введение только контроля с индикацией наличия ошибки (K_A), после которого оператору приходится выполнять операцию заново (рис. 5, а), либо S_2 – введение в АД после каждой из этих операций операции контроля (K_A) и операции исправления ошибок (D_A) (рис. 5, б). При этом во втором случае нужно будет не только реализовывать информационное сообщение о сути и месте нахождения ошибки, но и обеспечивать возможность ее исправления без повторения операции с самого начала.

В соответствии с формулами (1), (2) и (5), (6) по аналогии с (7), (8) вычислим (в силу одинаковости всех элементов) значения для первого элемента $\beta_{S_1}^1(A_{i_1}), \beta_{S_2}^1(A_{i_1})$ и значения $\Delta T_{S_1}(A_{i_1})$ и $\Delta T_{S_2}(A_{i_1})$, и сравним их между собой.

Выполнение неравенств

$$\begin{aligned} \beta_{S_1}^1(A_{i_1}) \geq \beta_{S_2}^1(A_{i_1}); \quad \Delta T_{S_1}(A_{i_1}) \leq \Delta T_{S_2}(A_{i_1}); \\ n\Delta T_{S_1}(A_{i_1}) < T_{\text{рез}} = T_{\text{зад}} - T_{\text{ср}} \end{aligned} \quad (10)$$

свидетельствует о том, что вариант изменения фрагмента АД введением одного контроля с последующим повторением основной операции (вариант S_1) более выгоден (лучше), чем вариант S_2 , связанный с введением контроля и последующим исправлением допущенной ошибки ($S_1 \succ S_2$).

Выполнение неравенств

$$\begin{aligned} \beta_{S_1}^1(A_{i_1}) \leq \beta_{S_2}^1(A_{i_1}); \quad \Delta T_{S_1}(A_{i_1}) \geq \Delta T_{S_2}(A_{i_1}); \\ n\Delta T_{S_2}(A_{i_1}) < T_{\text{рез}} = T_{\text{зад}} - T_{\text{ср}} \end{aligned} \quad (11)$$

свидетельствует о том, что вариант изменения фрагмента АД введением контроля и последующего исправления допущенной ошибки (вариант S_2) более выгоден (лучше), чем вариант S_1 , связанный с введением одного контроля с последующим повторением основной операции ($S_2 \succ S_1$).

Появление коэффициента (сомножителя) n при проверке увеличения времени выполнения АД (правые части неравенств (10) и (11)) обусловлено количеством однотипных (одинаковых) критических операций.

Если ни одно из соотношений (10) и (11) не выполняется, то сначала вычисляются только изменения времени выполнения АД, которые сравниваются с имеющим резервом времени. Если оба изменения времени выполнения рассматриваемого фрагмента меньше оставшегося резерва времени, т. е. выполняется соотношение

$$(n\Delta T_{S_1}(A_{i_1}) < T_{\text{рез}}) \wedge (n\Delta T_{S_2}(A_{i_1}) < T_{\text{рез}}), \quad (12)$$

то выбор реализуется по большей вероятности безошибочного выполнения операции посредством сравнения значений $\beta_{S_1}^1(A_j)$ и $\beta_{S_2}^1(A_j)$.

Такой выбор по аналогии с предыдущим случаем обеспечивает значительное увеличение вероятности безошибочного выполнения АД в целом в силу мультипликативной зависимости от безошибочности отдельных фрагментов. При этом в данном конкретном случае дальнейшее улучшение АД не реализуется:

$$(n\Delta T_{S_1}(A_{i_1}) < T_{\text{рез}}) \vee (n\Delta T_{S_2}(A_{i_1}) < T_{\text{рез}}). \quad (13)$$

Невыполнение соотношения (12), но выполнение (13) указывает на единственное приемлемое решение, так как выбирается стратегия S_1 или S_2 , обеспечивающая выполнение АД за заданное время

Невыполнение соотношения (13) указывает на невозможность при данных характеристиках отдельных операций (базовых и вводимых в структуру АД) модифицировать (улучшить качество) АД и одновременно обеспечить его выполнение за заданное время.

Эти принципиальные трудности могут привести к пересмотру базового АД.

3. *Различные критические операции.* Пусть критическими являются три операции A_i, A_j, A_m . Не умаляя общности, будем полагать, что выполняется неравенство $i < j < m$. Далее проводится сравнительный анализ вероятностей безошибочного выполнения этих операций β_i^1, β_j^1 и β_m^1 . Также будем полагать, что выполняется неравенство $\beta_i^1 < \beta_j^1 < \beta_m^1$, т. е. операция A_i – наиболее критическая из трех выбранных.

Можно начинать улучшение с наихудшей операции (по вероятности безошибочного выполнения) или же проводить анализ всех операций параллельно. Первый способ аналогичен представленному в п. 1. Реализация второго способа заключается в одновременном вычислении в соответствии с (1), (2) и (5), (6) вычислим значения безошибочности и изменения времени выполнения для всех выделенных операций (фрагментов). Таким образом, получаем следующие наборы значений:

– для операции (фрагмента) A_i : $\beta_{S_1}^1(A_i)$ и $\beta_{S_2}^1(A_i), \Delta T_{S_1}(A_i)$ и $\Delta T_{S_2}(A_i)$;

– для операции (фрагмента) A_j : $\beta_{S_1}^1(A_j)$ и $\beta_{S_2}^1(A_j), \Delta T_{S_1}(A_j)$ и $\Delta T_{S_2}(A_j)$;

– для операции (фрагмента) A_m : $\beta_{S_1}^1(A_m)$ и $\beta_{S_2}^1(A_m), \Delta T_{S_1}(A_m)$ и $\Delta T_{S_2}(A_m)$;

$$\Delta T_S(A_i) + \Delta T_S(A_j) + \Delta T_S(A_m) < T_{\text{рез}}, \quad (14)$$

Если для каждой из операций соблюдается одно из соотношений (7) или (8), то выбор той или иной стратегии изменения структуры фрагмента завершен (как это представлено в п. 1) и выбрана некоторая стратегия. Выполнение неравенства (14) (идеальный случай) означает, что все три операции можно улучшить.

Если неравенство (14) не выполняется, то встает задача выбора тех операций, для которых улучшение даст наибольший эффект.

Для выбора наиболее перспективной операции (с точки зрения повышения ее безошибочности) целесообразно использовать критерий, оце-

нивающий относительное повышение ее безошибочности $\beta_{S(A_z)}^1 / \beta_z^1$, т. е. сравнить следующие значения: $\beta_S^1(A_i) / \beta_i^1, \beta_S^1(A_j) / \beta_j^1, \beta_S^1(A_m) / \beta_m^1$, наибольшее из которых и определяет операцию, которая подлежит улучшению в первую очередь.

Выбор предлагаемого критерия обусловлен тем, что вероятности безошибочного выполнения для базового и преобразованного алгоритмов (под преобразованным алгоритмом в данном случае понимается замена операции A_z структурой $S(A_z)$) имеют следующий вид:

$$\beta_{\text{баз}}^1 = \prod_{i=1}^n \beta_i^1, \quad \beta_{\text{АД}}^1 = \frac{\beta_{S(A_z)}^1}{\beta_z^1} \prod_{i=1}^n \beta_i^1.$$

После преобразования выбранной операции (получения структуры и расчета ее характеристик) пересчитывается резерв времени $T_{\text{рез}}^1 = T_{\text{рез}} - \Delta T_S(A_z)$. Затем задача выбора операции для улучшения решается заново до тех пор, пока это позволяет оставшийся резерв времени.

В случае необходимости учета ресурса $R(A_z)$, затрачиваемого на улучшение операции A_z с помощью некоторого структурного преобразования $S(A_z)$, в качестве критерия отбора следует использовать выражение $p(A_z) = \beta_{S(A_z)}^1 / R(A_z) \beta_z^1$, которое учитывает и относительное увеличение безошибочности, и затрачиваемый на это ресурс.

После реализации всех возможных улучшений осуществляется переход к стадии 4 для всесторонней оценки показателей полученного результирующего АД.

Стадия 4. Показатели безошибочности и времени выполнения были получены в процессе реализации работ на стадии 3 и их дополнительный расчет не нужен.

Ввиду того что в преобразованной структуре АД появились фрагменты с циклами, то для оценки нормированных коэффициентов стереотипности и логической сложности полученного АД следует применить подход, предложенный в [12].

Замечания: 1. В соответствии с [1], [13] для повышения безошибочности операций могут использоваться различные структуры фрагментов, а не только приведенные на рис. 5.

2. Возможно повышение безошибочности не отдельных операций, а нескольких операций в комплексе (общий контроль и др.).

В статье проработан комплекс вопросов, связанных с построением базового АД оператора разработчиком ИУ ЧМС. Предложен комплекс подходов и методов для повышения качества разработанного АД (повышение вероятности безошибочного выполнения) при наличии ограничений на время выполнения. Полученная модель

процесса формирования АД оператора служит основой методики построения АД. Модель представлена в виде, позволяющем упростить автоматизацию решения поставленных задач.

Выделение типовых фрагментов из построенного АД позволит сформировать некоторые требования к будущему оператору, а также упростить процесс его подготовки за счет создания линейки частных тренажеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания: справочник // под общ. ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993.
2. Падерно П. И., Суворов Н. Б. Надежность человека в системах управления: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
3. Раскин Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем / пер. с англ. СПб.: Символ-Плюс, 2010.
4. Назаренко Н. А. Оценка качества взаимодействия пользователей с автоматизированными системами управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 6. С. 44–54.
5. ГОСТ В 29.08.002–2005. Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Показатели качества деятельности операторов образцов вооружения и военной техники статистические. Номенклатура. Методы определения. М.: Стандартинформ, 2006.
6. ГОСТ РВ 29.04.002–84. Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Алгоритм и структура деятельности оператора. Общие эргономические требования. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
7. Военная инженерная психология / Б. Ф. Ломов, А. А. Васильев, В. В. Офицеров, В. Ф. Рубахин. М.: Воениздат, 1970.
8. Назаренко Н. А., Падерно П. И., Саторов Ф. Э. Способ оценки логической сложности и стереотипности алгоритмов деятельности операторов // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 4. С. 740–746.
9. Зарковский Г. М., Гальперин М. И., Петров В. П. Операционно-психофизиологический метод оценки загрузки человека-оператора // Авиационные цифровые системы контроля и управления / под ред. В. А. Мясникова, В. П. Петрова. Гл. 15. Л.: Машиностроение, 1976.
10. Суходольский Г. В. Математические методы в психологии. Харьков: Гуманитарный центр, 2008.
11. Губинский А. И., Евграфов В. Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Л.: Судостроение, 1977.
12. Назаренко Н. А., Падерно П. И. Оценка логической сложности и стереотипности циклических структур в алгоритмах деятельности оператора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 1. С. 52–60.
13. 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.

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

MODEL OF THE PROCESS OF DESIGNING ALGORITHMS FOR OPERATING ACTIVITIES

The analysis of the design process of the activity algorithms of the operators. A set of issues has been worked out related to the construction of a basic activity algorithm for the operator's activity by a developer of information and control man-machine systems. A set of approaches and methods is proposed for improving the quality of the developed activity algorithm (increasing the probability of error-free execution) in the presence of restrictions on the execution time. The resulting model of the process of forming an operator activity algorithm is the basis of the methodology for constructing an activity algorithm. The model is presented in a form that allows to simplify the automation of solving tasks. The presented results form the basis of the projected information module for supporting the activities of the developer of information and control man-machine systems in solving problems associated with the design and evaluation of activity algorithms for operators of developed complex man-machine systems and complexes for various purposes.

Activity algorithm, operator, design of activity algorithms, information management human-machine systems