При использовании материалов статьи необходимо использовать данную ссылку:
Мистров Л.Е., Шеповалов Е.М. Метод автоматизации проектирования авиационных многофункциональных тренажеров // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 1 (59). С. 135-145

УДК 004.921

МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

Мистров Л.Е., Шеповалов Е.М.

Предложен метод автоматизации проектирования авиационных многофункциональных тренажеров (АМТ) наземной подготовки экипажей воздушных судов, направленный на автоматизацию процесса проектирования для обоснования оптимального варианта его облика в интересах выполнения заданного множества учебных задач в некоторой предметной области. Приведена физическая и математическая постановка задачи функционального проектирования АМТ на основе оптимального распределения ресурса средств аппаратного и программного обеспечения для решения заданной номенклатуры учебных задач. Автоматизация проектирования основывается на временном (стадии) и детальном (аспекты, уровни) представлении процесса развертывания проектирования до уровня аппаратно-программных средств. Метод основывается на положениях теорий исследования операций, системного анализа, оптимального распределения ресурсов, графом, методов динамического программирования, ветвей и границ

Ключевые слова: воздушное судно, наземная летная подготовка, учебная задача, проектирование, авиационный многофункциональный тренажер, оптимизация, автоматизация проектирования, аппаратный и программный ресурс.

1 Общие положения

Современный уровень развития образовательной среды, компьютерной техники и информационных технологий позволяет моделировать практически любой вид деятельности человека, связанный с обработкой информации на основе проектирования различного типа информационных систем (ИС), к которым можно отнести и авиационные многофункциональные тренажеры (АМТ) [1,2]. Их применение направлено на повышение эффективности приобретения экипажами воздушных судов (ВС) знаний и навыков в своей предметной области. Основу их проектирования составляет задача принятия решений по многокритериальному выбору решений, возникающая при оптимизации программного и аппаратного ресурса для моделирования АМТ. Под понятие АМТ попадает широкий круг тренажеров, предназначенных для решения задач планирования и управления аппаратным и программным ресурсом средств при решении учебных задач подготовки экипажей ВС. Они характеризуются наличием большого количества технологических операций по анализу и обработке информации, многообразием типов аппаратно-программных средств (АПС), множеством вариантов их использования и многообразием условий протекания информационных процессов при решении АМТ учебных задач.

В современных условиях при проектировании АМТ и технологическом перевооружении морально устаревших авиационных тренажеров (АТ) в интересах

Мистров Леонид Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Центральный филиал Российского государственного университета правосудия
Воронеж
Шеповалов Евгений Михайлович, начальник авиационного тренажера, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
Воронеж

расширения вида и количества решаемых ими учебных задач, возникают новые, разноплановые задачи, решение которых связано с рядом особенностей.

Во-первых, установление вида и количества, не перекрываемого морально устаревшим программным и аппаратным обеспечением решения вновь возникающих учебных задач. Это обусловливает необходимость модернизации, реконфигурации морально устаревших АТ и проектирования нового программно-аппаратного обеспечения в структуре АМТ; в противном случае значительно возрастает количество АПС для решения новых учебных задач.

Во-вторых, различие целей проектирования различного типа АМТ и иерархичность системы показателей, характеризующих их эффективность решения множества учебных задач, предполагает формирование «индивидуального» вектора критериев эффективности решений каждой учебной задачи.

В-третьих, на обоснование состава АПС обеспечения функционирования АМТ оказывают существенное влияние и особенности технологического процесса решения учебных задач, такие как: разноплановость учебных задач; циркуляция в контурах принятия решений при моделировании учебных задач разнородной количественной и качественной информации; сетевая структура технологических процессов, состоящая в наличии множества разнообразных элементарных технологических операций (ЭТО) [5] и технологических циклов сборки, повторения и разветвления операций при формировании иерархической структуры программных компонент (ПК) на маршрутах решения каждой уникальной в своем роде учебной задачи [3,4]; универсальность применяемых АПС, а также различного типа технологические потери при переходе от одной операции к другой при выполнении учебной задачи. Наличие таких ограничений существенно усложняет процесс принятия решений по формированию состава АПС обеспечения функционирования АМТ.

Данные особенности предопредели актуальность задачи проектирования облика программно-аппаратного обеспечения АМТ, которая, с одной стороны, позволяла бы с инвариантных позиций решать эту задачу независимо от типа и эффективности устаревшего программно-аппаратного обеспечения, а с другой – обеспечила возможность его модернизации (реконфигурации) для решения тех или иных учебных задач в структуре АМТ. Применение подавляющего большинства АМТ является недостаточно эффективным вследствие того, что проектирование обучающего программного обеспечения (ПО) представляет сложный и не до конца определенный информационный процесс, зависящий от профессионализма и субъективизма понимания учебных задач разработчиком и программистом. Все просчеты, связанные с несовершенством ПО в принципе устранимы как на этапе разработки технического задания (ТЗ) на создание АМТ, так и в процессе его опытной эксплуатации и последующей доводки. На начальном этапе обоснования ТЗ на АМТ в условиях нечеткости и неопределенности исходных представлений об его облике и решаемых учебных задачах, задача проектирования состоит в обосновании основных технических требований, определяемых в основном параметрами ПО. Данные особенности и предопределили цель и содержание исследований, направленных на разработку метода автоматизации проектирования облика АМТ для решения задач подготовки экипажей ВС.

2. Основы автоматизации проектирования облика АМТ

Обоснование необходимости проектирования АМТ начинается с формирования, в первую очередь, его функционального облика – совокупности взаимосвязанных, взаимообусловленных и взаимосогласованных функций, посредством которых достигается решение заданной номенклатуры (типа и количества) учебных задач. Исследования по формированию функций АМТ определяют функциональный этап проектирования, цель которого состоит в раскрытии его строения, поскольку функции определяются структурой используемых АПС.

Совокупность задач, которые предполагается решать АМТ при подготовке экипажей ВС, в обобщенном виде выражается в цели его создания – достижении желаемого результата. В цепочке “цель-АМТ-результат” цель выполняет роль фактора системной упорядоченности различных мероприятий и актов (операций), совершаемых АМТ для её достижения, а результат представляет меру полноты достижения цели. Упорядоченная совокупность мероприятий и актов (операций) АМТ обусловливает способы его функционирования.

Расхождение между результатом и целью АМТ является мотивацией для корректировки цели, способа функционирования и его облика. Цель АМТ задается с уровня старшей инстанции и практически не подлежит изменению. Поэтому при проектировании АМТ могут корректироваться облик и способ его функционирования.

Способ функционирования АМТ является той конструктивной базой, на основе которой обосновываются его функции, формируется их содержание и производится их системная упорядоченность в виде той или иной функциональной структуры. Вариации способов функционирования АМТ приводят к соответствующему изменению реализующей его совокупности функций. Один и тот же способ функционирования АМТ характеризуется различной совокупностью его функций, и наоборот. Облик АМТ более консервативен, чем способ его функционирования, поскольку его функции "привязываются" к соответствующим его аппаратно-программным компонентам.

В общем случае способ функционирования АМТ может определяться совокупностью вопросов: "на что, кого" (объект действий), "что" (вещество, энергия, информация), "как" (с помощью какого эффекта или явления) и в "каких условиях" (пространственных, временных, информационных и т.д.). Это позволяет способ функционирования АМТ представить в виде:

$$< O, A, E, U >_S , \qquad (1)$$

где O – наименование объекта действий; A – поток (фактор) вещества, энергии или информации; E – наименование операции, представляющей реализацию желаемого эффекта; U – условия реализации операции E.

Аналогично каждая функция АМТ также может быть представлена в виде:

$$< O, A, E, U >_D . \qquad (2)$$

В процессе проектирования АМТ элементы (1) и (2) последовательно раскрываются и наполняются конкретным содержанием. Исходной мотивацией проектирования и внешним требованием к характеристикам облика АМТ является его цель. В соответствии с ней определяется предпочтительный способ функционирования АМТ применительно к параметрам условий его реализуемости.

Изначально в соответствии с (1) обосновывается объект O. После этого, на основе исследования свойств и характеристик объекта действий АМТ определяются виды факторов A и операций E, с помощью которых объект O будет переводиться в соответствии с целью (задачами) АМТ в желаемое состояние. При этом на начальном этапе анализа предполагается, что условия U для реализации операций E не оказывают на них существенного влияния. На заключительном этапе анализа исходя из учета условий U осуществляется уточнение объекта O, факторов A и операций E. Сформированная таким образом последовательность процедур определения способа функционирования АМТ формирует цикл исследований, который как правило повторяется до достижения требуемой полноты представлений о способе его функционирования. При этом функциональный облик АМТ вовлекается в определение способа функционирования через элементы A, E и U.

После предварительного формирования предпочтительного способа функционирования процесс проектирования направляется на определение функций АМТ, которые разделяются на внешние и внутренние. Внешние функции непосредственно связаны со способом функционирования АМТ, а внутренние функции являются обеспечивающими по отношению к внешним функциям. В выражении

$$< O, A, E, U >_{D_в} , \qquad (3)$$

характеризующем внешние функции АМТ, содержание элемента O составляет совокупность всех возможных факторов A (1), а элементы A и E – представляют множества факторов и операций, проводимых АМТ в отношении объекта O.

Условия U применительно к внешним функциям АМТ включают часть условий, входящих в состав U (1) и являющимися общими для АМТ и объекта действий, а также условия, определяемые собственно обликом тренажера и алгоритмом его функционирования.

Определим внутренние функции АМТ в виде:

$$< O, A, E, U >_{D_{вн}} . \qquad (4)$$

В выражении (4) в качестве объекта O анализируются факторы A и операции E, реализуемые внешними функциями АМТ и входящие в состав (3), а в качестве факторов A и операций E – те, которые реализуются его внутренними функциями в отношении внешних. Условия U для внутренних функций АМТ основываются на части условий внешних функций и собственно внутренних условий, определяемых его устройством и алгоритмами функционирования. Процедура формирования функций АМТ аналогично образуют цикл, имеющий итерационный характер. Совместно процедуры определения способа функционирования и функций АМТ образуют

итерационный процесс, заканчивающийся формированием его облика.

В содержательном смысле задача проектирования АМТ формулируется следующим образом. Пусть задана цель создания АМТ, условия и ограничения, применительно к которым он будет создаваться. Необходимо обосновать такую совокупность функций АМТ, различного типа и взаимосвязей АПС и алгоритмы их функционирования, которые обеспечивают реализацию цели его проектирования с эффективностью не менее заданное, характеризуемой решением определенного числа учебных задач.

Основу проектирования облика АМТ составляет в соответствии с [1,2] обоснование типа и состава АПС, функции управления (F_y) и функции переходов (F_n) при решении i -ых учебных задач. Функция управления F_y обеспечивает реализацию централизованного распределения ресурса АПС при управлении количеством и очередностью выполнения учебных задач или управление внешней гибкостью (адаптацией) технологической схемы проектирования АМТ за счет оптимального распределения ресурса АПС. Функция же переходов F_n обеспечивает реализацию процесса управления (оптимизации) ресурса ПК для выполнения каждой i -ой учебной задачи или управление внутренней гибкостью АМТ. Определение функций начинается с этапа структурного проектирования АМТ на основе обоснования состава АПС и установления между ними внутрисистемных связей по управлению, информационному обеспечению и исполнению (на основе АПС) при решении учебных задач.

В общем случае, задачу проектирования АМТ можно представить задачей минимизации расходов на разработку оптимального облика (типа и S взаимосвязей АПС) V^* и F_y , F_n функций управления (распределения) ресурса R программных средств, т.е. такой организации его реализации в предположении заранее определенной (оптимальной, заданной) конфигурации аппаратных средств, которая обеспечивает оптимальное значение $W(V,U)$ показателя эффективности решения заданного W_T множества учебных задач на множестве U условий применения и в общем виде представляется зависимостью:

$$V^{D*} = Arg \min_{V^D \in \{V^D\}_Д} C(V^D, R, S, F_y, F_n, U), \quad (5)$$

$$\{V^D\}_Д = \{V^D : V^D \in V = (V^D, F_y, F_n),$$
$$W(V,U) \geq W_{TP},$$
$$R(V^D,U) \subseteq R,\ S = S^* = const\},$$

где C – функция затрат на реализацию АМТ в интересах обеспечения применения в заданных условиях U ; V^D – множество параметров АПС, характеризующих облик АМТ; $\{V^D\}_Д$ – множество допустимых вариантов облика АМТ; F_y, F_n – множества параметров, описывающие стратегии применения АМТ при решении W множества учебных задач и одной учебной задачи, соответственно; $W(V,U)$ – показатель эффективности АМТ; W_{TP} – требуемое значение интегрального показателя эффективности АМТ; $R(V^D,U)$ – ресурс АПС, необходимый для реализации V^D облика АМТ при решения учебных задач в условиях U .

Строго математически решить задачу (5) фактически невозможно вследствие её значительной размерности, сложной взаимосвязи переменных в функциональных зависимостях и наличия целого ряда неопределенных факторов, многие из которых носят вероятностный характер. Данная ситуация является вполне естественной для начальной стадии проектирования любой сложной системы. Основным методом приближенного нахождения решения задачи проектирования облика АМТ является его декомпозиция на систему частных задач на основе теории иерархических многоуровневых структур.

Осуществим по аналогии с [6] декомпозицию задачи проектирования (5) с использованием иерархических структур: аспектов, уровней и стадий реализации облика АМТ. При этом в качестве основных рассматриваются процессуальный, операционный, структурный и параметрический аспекты облика АМТ. Это обеспечивает представление облика АМТ в виде $V^D = (V_A^D, V_E^D, V_S^D, V_X^D)$, включающем совокупность множеств, описывающих функциональные свойства АМТ, порождающие факторы $A(V_A^D)$ и относящиеся к операциям $E(V_E^D)$, структуру функций (V_S^D) , характеристики и параметры функций (V_X^D) .

В зависимости от начального состояния проектирования облика АМТ и целей его проектирования между аспектами могут устанавливаться различные иерархические

отношения. При этом декомпозиция задачи (5) преобразуется к виду:
задача определения действующих факторов АМТ

$$V_A^{D*} = Arg \min_{V_A^D \in \{V_A^D\}_Д} C(V_A^D, \tilde{V}_E^{D*}, \tilde{V}_S^{D*}, \tilde{V}_X^{D*}, U), \quad (6)$$
$$\{V_A^D\}_Д = \{V_A^D : V_A^D \in V^D = (V_A^D, \tilde{V}_E^{D*}, \tilde{V}_S^{D*}, \tilde{V}_X^{D*}),$$
$$W(V,U) \geq W_{ТР},\ R(V_A^D, U) \subseteq R\};$$

задача определения операций, реализуемых АМТ

$$V_E^{D*} = Arg \min_{V_E^D \in \{V_E^D\}_Д} C(\tilde{V}_A^{D*}, V_E^D, \tilde{V}_S^{D*}, \tilde{V}_X^{D*}, U), \quad (7)$$
$$\{V_E^D\}_Д = \{V_E^D : V_E^D \in V^D = (\tilde{V}_A^{D*}, V_E^D, \tilde{V}_S^{D*}, \tilde{V}_X^{D*}),$$
$$W(V,U) \geq W_{ТР},\ R(V_E^D, U) \subseteq R\};$$

задача определения структуры функций АМТ

$$V_S^{D*} = Arg \min_{V_S^D \in \{V_S^D\}_Д} C(\tilde{V}_A^{D*}, \tilde{V}_E^{D*}, V_S^D, \tilde{V}_X^{D*}, U), \quad (8)$$
$$\{V_S^D\}_Д = \{V_S^D : V_S^D \in V^D = (\tilde{V}_A^{D*}, \tilde{V}_E^{D*}, V_S^D, \tilde{V}_X^{D*}),$$
$$W(V,U) \geq W_{ТР},\ R(V_S^D, U) \subseteq R\};$$

задача определения параметров АМТ

$$V_X^{D*} = Arg \min_{V_X^D \in \{V_X^D\}_Д} C(\tilde{V}_A^{D*}, \tilde{V}_E^{D*}, \tilde{V}_S^{D*}, V_X^D, U), \quad (9)$$
$$\{V_X^D\}_Д = \{V_X^D : V_X^D \in V^D = (\tilde{V}_A^{D*}, \tilde{V}_E^{D*}, \tilde{V}_S^{D*}, V_X^D),$$
$$W(V,U) \geq W_{ТР},\ R(V_X^D, U) \subseteq R\}.$$

Последовательное решение задач в виде (6)-(9) образует цикл итерационного процесса решения задачи проектирования (5). При невозможности получения приемлемого решения какой-либо одной из этих задач осуществляется уточнение решения других задач проектирования, а также условия и ограничения.

Для выявления взаимосвязей между множествами описаний облика АМТ на аспектах проектирования исследуем функции агрегирования и дезагрегирования множеств описаний облика на процессуальном F_{DA}, F_{DA}^{-1}, операционном F_{DE}, F_{DE}^{-1}, структурном F_{DS}, F_{DS}^{-1} и параметрическом F_{DX}, F_{DX}^{-1} аспектах, а также введем в рассмотрение функции обобщения его облика по аспектам G_{DA}, G_{DE}, G_{DS} и G_{DX}. Это позволяет взаимосвязь множеств описания облика АМТ представить зависимостями:

$$V_A^D = G_{DA}\{\tilde{V}_A^{D*}, F_{DA}(V_E^D, V_S^D, V_X^D)\},$$
$$V_E^D = G_{DE}\{\tilde{V}_E^{D*}, F_{DE}[F_{DA}^{-1}(V^D), V_S^D, V_X^D]\}, \quad (10)$$
$$V_S^D = G_{DS}\{\tilde{V}_S^{D*}, F_{DS}[F_{DE}^{-1}(V^D), V_X^D]\},$$
$$V_X^D = G_{DX}\{\tilde{V}_X^{D*}, F_{DX}[F_{DS}^{-1}(V^D)]\},$$
$$V_D = (V_A^D, V_E^D, V_S^D, V_X^D).$$

Декомпозиция же общей задачи проектирования АМТ по уровням разукрупнения основывается на следующих физических предположениях. Функция управления F_y АМТ проявляется в способе его функционирования так как ее содержание определяется процессуально и операционно выбранным методом действия на объект. Кроме того, ее содержание определяется также внутренними функциями АМТ, которые по отношению к ней выполняют обеспечивающую роль. Аналогично, функция переходов F_n АМТ также структурируется по общности. Более крупные, обобщающие функции, имеют характер внешних функций по отношению к менее крупным, входящих в их состав частным функциям. Количество уровней разукрупнения функций АМТ определяется необходимой глубиной проработки его облика.

Уровням разукрупнения облика АМТ ставятся в соответствие уровни проектирования, которые разделяются на внешнесистемный и внутрисистемные уровни. Уровень внешнесистемного проектирования направлен на определение внешних функций и способов функционирования АМТ, а также согласование и системную увязку всех функций АМТ, их свойств, параметров и принципов функционирования, обоснование которых осуществляется на уровнях внутрисистемного проектирования. С уровня внешнесистемного проектирования начинается процесс проектирования АМТ и на нем же и заканчивается. В результате неоднократного перехода от уровня к уровню проектирования в прямом и обратном направлении достигается соответствие между функциональными свойствами, строением и функционированием АМТ, а также между параметрами отдельных функций и всего его облика в целом.

Аналогично, как и при проектировании АМТ в целом, между множествами описаний его облика по уровням разукрупнения можно установить следующие соотношения:

$$V_l^D = \Phi_{Dl}[H_{D(l-1)}^{-1}(V_{l-1}^D), H_{Dl}(V_{l+1}^D)],$$
$$l = 1,2,..., \quad (11)$$
$$V_0^D = H_{D0}(V_1^D), \qquad V^D = (V_0^D, V_1^D, ...),$$

где V_l^D – множество, описывающее на l -ом уровне разукрупнения внутрисистемного проектирования облик АМТ; Φ_{Dl} – функция обобщения описания на l -ом уровне разукрупнения облика АМТ; H_{Dl} , $H_{D(l-1)}^{-1}$ – соответственно функции агрегирования и дезагрегирования множества, описывающего на l -ом и (l -1) -ом уровнях разукрупнения облик АМТ; V_0^D – множество, описывающее на уровне внешнесистемного проектирования облик АМТ.

При фиксированном уровне разукрупнения облика АМТ дальнейшая структуризация функций осуществляется “по горизонтали” на совокупность не связанных иерархическими отношениями функций. Объединение множеств, описывающих их, обеспечивает формирование общего представления облика АМТ на данном уровне разукрупнения вида:

$$V_l^D = (V_{1l}^D, ..., V_{jl}^D, ..., V_{N_l l}^D), \quad (12)$$
$$V_{jl}^D = \Phi_{jl}[H_{j(l-1)}^{-1}(V_{l-1}^D), H_{jl}(V_{l+1}^D)],$$

где V_{jl}^D – множество, описывающее j -ю функцию l -го уровня разукрупнения облика АМТ; N_l – общее количество функций l -го уровня разукрупнения облика АМТ; Φ_{jl} – функция обобщения описания j -ой функции l -го уровня разукрупнения облика АМТ; $H_{j(l-1)}^{-1}$ – функция дезагрегирования множества, описывающего на (l -1) -м уровне разукрупнения облик АМТ, применительно к j -й функции l -го уровня; H_{jl} – функция агрегирования множества, описывающего на (l +1) -м уровне разукрупнения облик АМТ, применительно к j -й функции l -го уровня.

В результате структуризации задачи проектирования (5) по уровням разукрупнения облика АМТ формируется семейство иерархически связанных задач его внешнесистемного и внутрисистемного проектирования.

Задача внешнесистемного проектирования АМТ представляется аналогично задаче (5) с той разницей, что вместо V^D в ней приводится V_0^D.

Задачи внутрисистемного проектирования облика АМТ имеют вид:

задача l -го уровня проектирования облика АМТ

$$V_l^{D*} = Arg \min_{V_l^D \in \{V_l^D\}_Д} C(V_l^D, U), \quad (13)$$
$$\{V_l^D\}_Д = \{V_l^D : W(V_l^D, U_l) \geq W_{ТР},\ R(V_l^D, U_l) \subseteq R_l\},$$
$$l = 1,2,...,\ \ R_l \in R = (R_1, ..., R_l, ...),$$
$$V_l^{D*} = (V_{1l}^{D*}, ..., V_{jl}^{D*}, ..., V_{N_l l}^{D*}),$$

задача проектирования j -ой функции l -го уровня облика АМТ

$$V_{jl}^{D*} = Arg \min_{V_{jl}^D \in \{V_{jl}^D\}_Д} C_{jl}(V_{jl}^D, U_{jl}), \quad (14)$$
$$\{V_{jl}^D\}_Д = \{V_{jl}^D : V_{jl}^D \in V_l^D = (V_{1l}^{D*}, ..., V_{jl}^D, \tilde{V}_{(j+1)l}^{D*}, ..., \tilde{V}_{N_l l}^{D*}),$$
$$W_{jl}(V_{jl}^D, U_{jl}) \geq W_{ТР\ jl},\ R_{jl}(V_{jl}^D, U_{jl}) \subseteq R_{jl}\},$$
$$j = \overline{1, N_l}, \qquad W = W(W_{1l}, ..., W_{jl}, ..., W_{N_l l}),$$
$$C = C(C_{1l}, ..., C_{jl}, ..., C_{N_l l}),$$
$$R_{jl} \in R_l = (R_{1l}, ..., R_{jl}, ..., R_{N_l l}),$$
$$U_{jl} \in U_l = (U_{1l}, ..., U_{jl}, ..., U_{N_l l}).$$

Ввиду существенной сложности решение задачи проектирования АМТ осуществляется последовательно по временным стадиям проектирования. На каждой стадии проектирования формируется новое, более полное представление о функциях АМТ, их взаимосвязях, параметрах и его функционировании.

На начальной стадии проектирования определяется способ функционирования АМТ и концептуальные представления об его облике (обосновываются внешние границы). На ней облик АМТ исследуется в виде целостной системы “идеальных”, то есть в принципе реализуемых функций. На второй стадии проектирования осуществляется определение основных функций АМТ, характеризующих его назначение и эффективность применения с учетом в полной мере условий и ограничений реализуемости основных функций, что придает им характер “реальности”. В отношении других функций делается предположение, что они как “идеальные” также реализуются в полном объеме.

На последующих стадиях проектирования исследования направляются на определение следующих функций, а также на уточнение функций, определенных на предыдущих стадиях. На заключительной стадии проектирования облик АМТ рассматривается в полном, как того требуют цели исследований, объеме в виде

системы “реальных” функций. При этом акцент делается на обоснование предпочтительных алгоритмов функционирования АМТ. Между стадиями проектирования устанавливаются информационные связи, обеспечивающие выдачу необходимых исходных данных, а также уточнение при необходимости, как постановок задач, так и результатов их решения.

При декомпозиции задачи проектирования АМТ по стадиям проектирования частная задача проектирования на i -ой стадии представляется в виде:

$$V_{\text{э}i}^{D*} = Arg \min_{V_{\text{э}i}^{D} \in \{V_{\text{э}i}^{D}\}_{\text{Д}}} C(V_{\text{э}i}^{D}, U_{\text{э}i}), \quad (15)$$

$$\{V_{\text{э}i}^{D}\}_{\text{Д}} = \{V_{\text{э}i}^{D} : W(V_{\text{э}i}^{D}, U_{\text{э}i}) \geq W_{\text{ТР}}, R(V_{\text{э}i}^{D}, U_{\text{э}i}) \subseteq R\},$$

$$j = \overline{1, N_l}, \quad W = W(W_{1l}, ..., W_{jl}, ..., W_{N_l l}),$$

$$C = C(C_{1l}, ..., C_{jl}, ..., C_{N_l l}),$$

$$V_{\text{э}i}^{D} = \Phi_{\text{э}i}[F_{\text{э}(i-1)}^{-1}(V_{\text{э}(i-1)}^{D*}), F_{\text{э}i}(\tilde{V}_{\text{зак}}^{D*})],$$

$$\text{Э}_i = \begin{cases} \text{кон}, & i = 0; \\ \text{пр}_i, & i = \overline{1, N}; \\ \text{зак}, & i = N + 1; \end{cases}$$

$$V_{\text{эо}}^{D} = V_{\text{кон}}^{D} = \Phi_{\text{кон}}[F_{\text{кон}}(\tilde{V}_{\text{пр1}}^{D*}), \tilde{V}_{\text{зак}}^{D*}],$$

$$V_{\text{пр}\,i}^{D} = \Phi_{\text{пр}\,i}[F_{\text{пр}\,(i-1)}^{-1}(V_{\text{пр}(i-1)}^{D*}), F_{\text{пр}\,i}(\tilde{V}_{\text{зак}}^{D*})],$$

$$V_{\text{зак}}^{D*} = V^{D*},$$

где $\Phi_{\text{э}i}$ – функция обобщения представления на i -ой стадии проектирования облика АМТ; $F_{\text{э}(i-1)}^{-1}$, $F_{\text{э}i}$ – функции дезагрегирования и агрегирования представления на $(i-1)$ -ой и i -ой стадии проектирования облика АМТ, соответственно; N – общее количество стадий проектирования облика АМТ.

Как и при проектировании АМТ в целом, декомпозиция общей задачи его проектирования (5) по стадиям проектирования представляет основу, на базе которой проводится дальнейшее развертывание процесса проектирования по аспектам и уровням. При этом частные задачи проектирования по аспектам и уровням, выполняя поочередно иерархически главную роль “вкладываются” друг в друга, а вместе – в частную задачу проектирования на рассматриваемой стадии. Внутри каждого вида декомпозиции облика АМТ также поочередно сменяется иерархически главный аспект (уровень, стадия). В результате образуются многоконтурные циклические итерационные процессы, обеспечивающие решение общей задачи автоматизации проектирования АМТ.

3. Основные положения метода проектирования АМТ

Метод проектирования АМТ, исходя из целей и системы предпочтений его заказчика – желаемый образ будущего его облика в пределах выделенного ресурса АПС, условий и ограничений на применение, формулируемого в виде (5) основывается на решении следующей совокупности основных задач (схематичное представление метода проектирования приведено на рисунке 1).

1. На основе системного анализа определенного множества учебных задач (УЗ), выполняемых существующими АТ, выделяется проблемная ситуация в виде объективного противоречия между требуемым и реальным решением ими множества УЗ. Установлением причинно-следственных отношений по управлению, информационному обеспечению и исполнению (на основе АПС), проявляющихся в структуре АМТ при выполнении УЗ, осуществляется его функциональный анализ (описание состава, структуры и функциональных связей) и представление в виде описательной модели применения как функции пространственно-временных характеристик условий выполнения задач экипажем конкретного типа ВС с различными вариантами оснащения. Описательная модель АМТ представляет взаимосвязанную систему декомпозированных и взаимообусловленных по уровням исследований типовых элементарных, простых, сложных и целевых ситуаций, отражающих пространственно-временную динамику специфических способов применения конкретных типов ВС.

2. На основе априорной информации о подлежащих решению УЗ, характеристиках существующих и перспективных АПС и параметрах описательной модели применения АМТ осуществляется формирование вариантов облика АМТ в виде морфологического множества состава АПС с установлением связей по управлению (между АПС различных уровней), взаимодействию (между элементами АПО одного уровня) и информационному взаимодействию (между АПС различных уровней) с учетом множества информационных, технологических, энергетических, эксплуатационных и пространственно-временных ограничений по способам применения АМТ. Основу при реализации функции переходов F_n составляют связи следования, взаимоисключающие, когда-либо то, либо другое АПС не может выполнить одну и ту же функциональную задачу (определяются на основе декомпозиции УЗ по

логическим этапам выполнения АПС) и взаимодействующие, когда и та же задача может выполняться несколькими АПС.

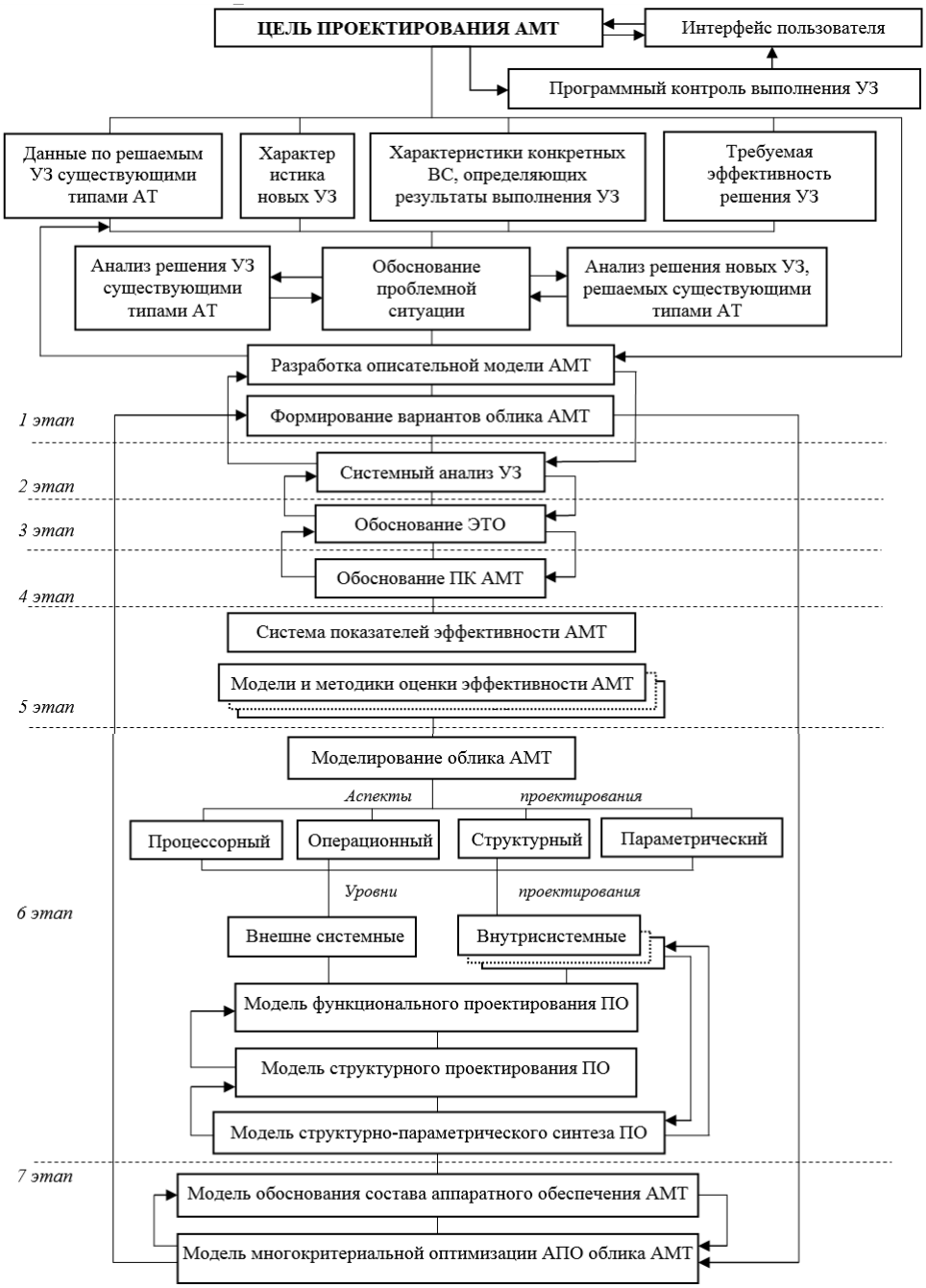

Рисунок1. Метод автоматизации проектирования АМТ

3. Для формального исследования облика АМТ методом инвариантного погружения [7] осуществляется функционально-структурная детализации УЗ на взаимообусловленную систему учебных подзадач, представляющие целостное множество операций, выполняемых экипажем конкретного типа ВС при последовательной реализации того или иного способа выполнения полетного задания в виде многомерного вектора элементарных фрагментов (ЭФ) учебных подзадач. ЭФ представляют взаимосвязанную совокупность параметров приемов, выполняемых экипажем при выполнении учебной подзадачи. Исходя из их функционального предназначения они объединяются в группы информационных,

тактических и технических параметров для реализации программными средствами на нижних уровнях проектирования облика АМТ. С этой целью проводится структурно-функциональный анализ групп ЭФ учебных подзадач в интересах оценки возможностей ЭТО по их обработке, структуризация и представление в виде базы данных (системы первичных таблиц) для обоснования и построения информационного банка ЭТО. С помощью итерационных оптимизационных процедур осуществляется проверка условий полноты и логической непротиворечивости систематического покрытия ЭТО всех ЭФ (системная адаптация ЭТО к множеству ЭФ) – оптимизация целей ведётся до уровня отдельных средств программного обеспечения.

4. На основе построенного информационного банка ЭТО с помощью итерационной оптимизационной процедуры методом систематического покрытия проводится формирование адаптивного множества групп ПК для моделирования *j* -го типа учебных подзадач в виде объединенных единством цели определенных групп ЭТО и проверка методом логико-эвристического анализа их полноты и непротиворечивости с помощью формализованных условий и аксиоматических правил.

5. Для решения *j* -го типа учебных подзадач с помощью обоснованной системы ПК осуществляется по системному, информационно-системным и информационным показателям разработка иерархической системы аналитических, имитационных и смешанных моделей и методик оценки эффективности АПС и АМТ в целом. Разработка моделей (методик) производится на всех иерархических уровнях, начиная с верхнего. Модель каждого уровня специфична: определяет факторы (задачи, ресурсы, ограничения, внешние и внутренние противоречия, связи), присущие уровню. Укрупнённая модель верхнего уровня обеспечивает "стыковку" различных математических моделей, разрабатываемых на нижних уровнях.

Структурное представление АМТ в виде системы моделей и методик позволяет осуществить детализацию цели оценки его эффективности на иерархический ряд подцелей. При этом исходными целями каждого следующего уровня системы моделей (методик) являются декомпозированные конечные цели ее предыдущего уровня. Введение и использование в системе моделей количественных показателей эффективности АМТ обеспечивает осуществление непосредственного перехода к решению им УЗ, определяемых необходимую степень достижения цели, представленных в виде результатов оценки эффективности вариантов облика и способов функционирования АМТ с учётом возможности их технической реализации АПС на множестве данных применительно к типовым элементарным, простым, сложным и целевым ситуациям.

6. Нахождение информационно-системных показателей АМТ позволяет установить базисные свойства информационного пространства взаимодействия его элементов на функциональном, структурном и параметрическом аспектах проектирования. Цель моделирования состоит в формировании полной модели фазового пространства состояний АПС при решении каждой УЗ. Оптимизация параметров фазового пространства взаимодействия АПС с соответствующими элементами, декомпозированной УЗ осуществляется по результатам оценки качества его элементов применительно к типовым условиям применения. В качестве параметров рассматриваются исходные данные по характеристикам УЗ, установленные зависимости для расчета параметров пространства состояний АМТ, различные целевые функции и ряд параметров моделирующих действий по решению каждой УЗ. Из всех результатов расчетов выбираются те, для которых: а) экстремальные точки значений целевых функций представлены в максимальном диапазоне значений и б) при наличии экстремальных значений выделяются области, в которой они расположены.

Полученные результаты исследований подлежат анализу при реализации функции управления F_y на уровне АМТ, где при необходимости принимаются решения по их корректировке, касающиеся в основном, объёма и / или решаемых УЗ или выделению дополнительных ресурсов, необходимых для разработки АПС.

7. Определение же системного показателя эффективности АМТ осуществляется методом погрупповой оптимизации облика программного и аппаратного обеспечения на уровнях функционального, структурного и параметрического проектирования. Оптимизация результатов основывается на формировании пространства состояний ЭФ невыполненных УЗ АМТ. Это обеспечивает проведение анализа и выбор по критерию заданной эффективности предпочтительных вариантов облика АМТ на множестве способов функционирования АПС для выявления их номенклатуры. Для этого с помощью аналитических методик расчёта эффективности АМТ осуществляется сравнительная оценка

эффективности различных вариантов его АПС одного и того же назначения и выбирается наиболее эффективная номенклатура, на основе которой определяется их количественный состав и способы применения АМТ.

Кроме того, осуществляется проверка выполнения сходимости результатов проектирования АМТ на функциональном, структурном и параметрическом аспектах проектирования, обеспечивающего поиск в области допустимых решений (с учетом ограничений и взаимосвязей АПС) предпочтительного варианта его облика на каждом аспекте с последующим обоснованием оптимального варианта на всех. Результатом решения задачи является разработка основных технических требований к вариантам облика АПС и АМТ в целом в виде информации по методам и средствам решения УЗ. Требования включают в себя также и качественные характеристики, такие как номенклатура необходимых технических характеристик АПС и особенности их функционирования при реализации каждой i-ой УЗ АМТ. Результатом исследований являются: а) определение оптимального облика элементов подсистемы АПО, управления и информационного обеспечения с расчётом значений их технико-экономических показателей; б) оценка технических возможностей выполнения требований со стороны АМТ к элементам АПО, управления и информационного обеспечения и в) расчёт эффективности по системному показателю и потребностей АМТ в АПС.

На основе сформированного допустимого множества состава АПС проводится факторный анализ многомерного пространства варьируемых параметров АМТ и поиск траектории оптимального варианта его облика в рамках действия ограничений, вытекающих из физической сущности поставленной задачи и согласование с результатами исследований организационной деятельности обслуживающего персонала АМТ.

В заключение следует отметить, что предложенный метод позволяет структурировать задачу проектирования структурно-сложного облика АМТ на систему вложенных, взаимообусловленных, итерационно-уточняющихся его динамических аспектно-уровневых обликов, что обеспечивает разукрупнение задач внешнесистемного и внутрисистемного проектирования до уровня параметров отдельных АПС и установление информационных взаимосвязей между ними, составляющих основу автоматизации проектирования АМТ. **iea**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мистров Л.Е. Основы принятия решений по разработке (модернизации) авиационных многофункциональных тренажеров / Л.Е. Мистров, Е.М. Шеповалов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2019. – №6. – С. 66-76.
2. Мистров Л.Е. Метод синтеза функционального облика авиационных многофункциональных тренажеров / Л.Е. Мистров, Е.М. Шеповалов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2020. – № 2 (54). – С. 47-57.
3. Мистров Л.Е. Метод структурно-параметрического синтеза программного обеспечения авиационных многофункциональных тренажеров / Л.Е. Мистров, А.В. Мишин, Е.М. Шепова-лов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2020. – №4-5. – С. 61-75.
4. Мистров Л.Е. Методика синтеза компонент программного обеспечения авиационных многофункциональных тренажеров / Л.Е. Мистров, Е.М. Шеповалов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – №3. – С. 28-35.
5. Мистров Л.Е. Метод формирования вариантов элементарных технологических операций реализации учебных задач авиационным многофункциональным тренажером / Л.Е. Мистров, Е.М. Шеповалов // Успехи современной радиоэлектроники. –2020. – Том 74. – №9. – С. 18-25.
6. Budkin Yu.V. The functional synthesis method of the machine-building complex organiza-tions / Budkin Yu.V., Zhuravleva T.B., Kvasnitskiy V.N., Zlydnev M.N., Mistrov L.E., Morozov V.P. // Journal "Svarochnoe Proizvodstvo" – 2020. – № 03.
7. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях – В сб.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений / Р. Беллман, Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – С. 172 – 215.

AIRCRAFT DESIGN AUTOMATION METHOD MULTIFUNCTIONAL SIMULATORS

Mistrov Leonid Evgenievich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin ", Central Branch of the Russian State University of Justice, Voronezh
Shepovalov Evgeny Mikhailovich, Head of the Aviation Simulator, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin ", Voronezh

A method is proposed for the automation of the design of multifunctional aviation simulators (AMT) for ground training of aircraft crews, aimed at automating the design process to substantiate the optimal version of its appearance in the interests of performing a given set of educational tasks in a certain subject area. The physical and mathematical formulation of the problem of functional synthesis of AMT based on the optimal resource allocation of hardware and software tools for solving a given nomenclature of educational problems is presented. Design automation is based on a time (stage) and detailed (aspects, levels) representation of the synthesis deployment process down to the hardware and software level. The method is based on the provisions of the theory of operations research, system analysis, optimal resource allocation, graph, dynamic programming methods, branches and boundaries.

Key words: aircraft, ground flight training, educational task, design, aviation multifunctional simulator, optimization, design automation, hardware and software resource

REFERENCES:

1. Mistrov, L.Ye., Shepovalov, E.M. Osnovy prinyatiya resheniy po razrabotke (modernizatsii) aviatsionnykh mno-gofunktsional'nykh trenazherov [*Fundamentals of decision making on the development (modernization) of aviation multifunctional simulators*]. *Uspekhi sovremennoy radio-elektroniki*. 2019, no. 6, pp.66-76.
2. Mistrov, L.Ye., Shepovalov, E.M. Metod sinteza funktsional'nogo oblika aviatsionnykh mnogofunktsional'nykh trenazherov [*The method of synthesis of the functional appearance of multifunctional aviation simulators*]. *Informatsionno-ekonomicheskiye aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya*. 2020, no. 2. (54), pp.47-57.
3. Mistrov, L.Ye., Mishin, A.V., Shepovalov, E.M. Metod strukturno-parametricheskogo sinteza programmnogo obespecheniya aviatsionnykh mnogofunktsional'nykh trenazherov [*Method of structural-parametric synthesis of software for aviation multifunctional simulators*]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2020, no. 4-5, pp.61-75.
4. Mistrov, L.Ye., Shepovalov, E.M. Metodika sinteza komponent programmnogo obespecheniya aviatsionnykh mnogofunktsional'nykh trenazherov [*Methods of synthesis of software components for aviation multifunctional simulators*]. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy*. 2020, no. 3, pp.28-35.
5. Mistrov, L.Ye., Shepovalov, E.M. Metod formirovaniya variantov elementarnykh tekhnologicheskikh operatsiy realizatsii uchebnykh zadach aviatsionnym mnogofunktsional'nym trenazherom [*Method of Formation of Variants of Elementary Technological Operations for Implementation of Training Tasks by Aviation Multifunctional Simulator*]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2020, Tom 74, no. 9, pp.18-25.
6. Budkin Yu.V. The functional synthesis method of the machine-building complex organiza-tions / Budkin Yu.V., Zhuravleva T.B., Kvasnitskiy V.N., Zlydnev M.N., Mistrov L.E., Morozov V.P. // Journal "Svarochnoe Proizvodstvo" – 2020. – №03.
7. Bellman R., Zade L. Prinyatiye resheniy v rasplyvchatykh usloviyakh [*Decision making in vague conditions*]. – *V sb.: Voprosy analiza i protsedu-ry prinyatiya resheniy. M: Mir*, 1976, pp. 172 – 215.