

УДК 681.3.07

СИНТЕЗ ТРЕБОВАНИЙ К БОРТОВОМУ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ И МОДЕЛИРУЮЩЕМУ КОМПЛЕКСУ

Д. П. Тетерин,канд. техн. наук, гл. конструктор
ОАО «КБ Электроприбор»

Изложены основные понятия и определения теории номенклатурного нормирования и вариант синтеза технических требований по назначению бортового информационно-измерительного и моделирующего комплекса.

Ключевые слова — технические требования, техническое задание на проектирование, математическое моделирование.

Введение

При проектировании сложных технических систем наиболее распространенными являются ошибки, связанные с формированием и обоснованием требований. Стоимость их устранения, как правило, самая высокая, что приводит к дополнительным затратам, составляющим 25–40 % бюджета проекта разработки в целом. Так, только в США ежегодно тратится более 250 млрд дол. на разработку приложений информационных технологий в рамках примерно 175 тыс. проектов. 31 % этих проектов прекращается до завершения. Затраты на 52,7 % проектов составляют 189 % от первоначальной оценки. Причинами провалов третьей части проектов, по данным статистики, являются проблемы, непосредственно связанные «со сбором и документированием требований, а также с управлением ими» [1].

Бурное развитие в последние десятилетия вычислительной техники предопределило повсеместное использование систем автоматизированного проектирования (САПР). Сроки проектирования сложных технических систем сократились на 20–40 %, но проблемы обоснования требований остались. В современных САПР средства поддержки начальных этапов проектирования систем, связанных с формированием технического задания и обоснованием требований, наименее развиты. Формирование требований является исключительной прерогативой высококвалифицированных специалистов, не застрахованных от принятия ошибочных решений. Теоретические

исследования в обозначенной проблемной области охватывают в основном процессы обоснования количественных частей требований и не позволяют формализовать (автоматизировать) весь процесс формирования технического задания на разработку (модернизацию) сложных технических систем.

Постановка и решение задачи

Используя понятия теории принятия решений, теории систем, системного и нормативного анализа, стандартизации и нормативного обеспечения, математической логики, теории четких и нечетких множеств, теории вероятностей, комбинаторики, теории эффективности и качества, рассмотрим вариант синтеза технических требований по назначению на примере формирования технического задания на разработку бортового информационно-измерительного и моделирующего комплекса (БИИМК) летательного аппарата.

Проблема обоснования требований к БИИМК решается на взаимосвязанных стадиях номенклатурного, структурного и количественного нормирования, которые при необходимости повторяются на различных уровнях абстрагирования.

Прежде чем обосновывать какое-либо требование количественно, целесообразно установить необходимость непосредственного включения его в техническое задание или последующего преобразования в нормируемые функции, задачи или характеристики комплексов, т. е. вначале следу-

ет определиться со словесными частями требований [2, 3].

Словесные части требований по назначению БИИМК могут быть получены методами синтеза из элементарных и производных составляющих требований. *Элементарной составляющей* (элементом требования — ЭТ) называется неделимая на исследуемом уровне часть требования. Элементы требования представляют собой часто встречающиеся во многих требованиях компоненты. Из элементов образуются *производные составляющие*, т. е. подцели, работы, задачи комплекса, словесные части требований и конкретные требования по назначению.

К элементам исходных требований относятся:

- цели комплекса;
- объекты, обслуживаемые комплексом;
- наименования требований;
- исходные состояния и условия применения комплекса;
- задачи, функции, операции и работы подсистем комплекса;
- количественные части требований.

Например, целями разработки БИИМК могут быть: управление, контроль состояния, ремонт и т. п. В процессе преобразований цели будем обозначать кодами: $\Pi = \{\Pi_0, \Pi_1, \dots\}$, где Π — подмножество целей создания комплекса; Π_i — i -я цель разработки комплекса ($i = 0, 1, 2, \dots$).

Цель — это то, чего добивается, к чему стремится или для достижения чего создается комплекс.

Объекты, обслуживаемые БИИМК (газотурбинный двигатель — ГТД, регулятор, датчики, исполнительные механизмы): $A = \{A_1, A_2, \dots\}$.

Возможные *исходные состояния* комплекса (степени готовности): $\Gamma = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots\}$.

Условия (географические, климатические, противодействия, специфические), в которых должны достигаться цели разработки комплекса: $Y = \{Y_a, Y_n, Y_c\}$, где Y_a — подмножество условий эксплуатации; Y_n — подмножество условий противодействия; Y_c — подмножество специфических условий.

В процессе достижения своих целей БИИМК, его подсистемы и элементы выполняют определенные задачи, функции, операции и работы:

— *функции* разрабатываемого комплекса (например, по отношению к цели «моделирование ГТД» функциями могут быть: численное моделирование, аналитическое моделирование, аналоговое моделирование): $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots\}$;

— *операции*, выполняемые комплексом (по отношению к функции «аналитическое моделирование» операциями могут быть: построение обратного преобразования Лапласа, решение обыкновенного дифференциального уравнения).

Наименования требований (по эффективности, безопасности, надежности, конструктивные требования и т. д.): $H = \{H_1, H_2, \dots\}$.

Кодирование ЭТ и самих требований. ЭТ не удобны для математических преобразований, так как представляют собой положения, относящиеся к физически разнородным явлениям, процессам и объектам, измеряемым по различным шкалам. Поэтому исходные и промежуточные данные, необходимые для обоснования требований, приводятся к виду, позволяющему быстро перейти от физической сущности задачи к ее формальному описанию на этапах решения и наоборот — от формального описания результатов к их физической сущности на этапах анализа результатов. При этом каждой составляющей присваивается свой код, который применяется вместо нее в процессе математических преобразований (табл. 1). В качестве кодов могут использоваться слова, обозначения, числа, буквы и комбинации символов.

Комбинациями ЭТ будем называть производные составляющие требований (подцели, работы, ситуации, задачи, конкретные требования) и комбинаторные соединения из ЭТ (перестановки, сочетания, размещения, объединения, пересечения и выборки), когда нужно применить общее для них название или нет необходимости уточнять их классификационные особенности.

Комбинации ЭТ в процессе преобразований представляются соответствующими комбинациями кодов, т. е. кодировками. Коды ЭТ в кодировках разделяются точками.

Например, подмножество кодов $\Pi_1 \times A_1 \times \Gamma_5$ из табл. 1 означает: аналитическое моделирование

■ Таблица 1. Выборка ЭТ к БИИМК

Коды ЭТ		Формулировка элементов требования
Ц	Π_1	Аналитическое моделирование
	Π_2	Приближенное численное моделирование
	Π_3	Аналоговое моделирование
Г	Γ_1	Дифференциальные уравнения n -го порядка в форме Коши
	Γ_5	Дифференциальные уравнения n -го порядка с переменными коэффициентами и функцией Дирака (Хевисайда) в правой части
	Γ_7	Типовые динамические звенья
	Γ_{10}	Дробно-рациональные комплексные функции
А	A_1	Линейные элементы ГТД
	A_2	Нелинейные элементы ГТД
Н	H_2	С достоверностью β_i математическое ожидание времени выполнения задачи E_i не должно превышать значения M_i

линейных элементов ГТД, описанных дифференциальными уравнениями n -го порядка с переменными коэффициентами и функцией Дирака (Хевисайда) в правой части.

Словесно описанные ЭТ, требования и выборки требований при большом их числе становятся не обозримыми для анализа. Поэтому уже в процессе сбора исходных данных осуществляется их упорядочение в целях последующей формализации, т. е. дискретизации, редактирования, систематизации и кодирования. Благодаря формализации обеспечиваются возможности формирования словесных частей требований по математическим законам и появляются следующие преимущества:

- существенно сокращается подлежащий анализу текст;

- отпадает необходимость в чтении и осмыслении содержания требований в процессе преобразований;

- упрощается процесс выполнения логических и математических операций;

- появляется возможность математического исчисления содержательной части требований;

- создаются условия для применения ЭВМ в процессе нормирования.

Упорядочение ЭТ и самих требований заключается в распределении их по уровням абстрагирования, в разбиении по признакам и аспектам нормирования на классы, группы, подгруппы, в ранжировании по предпочтениям в составе групп. Распределение по уровням осуществляется в целях выдвигания требований на уровнях комплекса, подсистем или элементов разрабатываемого БИИМК.

Классификация ЭТ производится по признакам принадлежности к элементарным и производным составляющим.

Ранжирование по предпочтениям предполагает упорядочение по важности, по установленному порядку следования, по отношениям больше — меньше и т. д.

Множество возможных сочетаний условий эксплуатации и параметров будущего комплекса является бесконечным. Число ЭТ в подмножествах состояний и объектов обслуживания также может быть избыточным. Для уменьшения числа конкретных требований применяются *приемы дискретизации*:

- диапазон возможных значений непрерывной составляющей (например, температура от -40 до $+85$ °С) разбивается на интервалы. Длина интервала выбирается такой, чтобы проверка способности выполнения функций комплекса в любой его точке обеспечивала достаточную способность к выполнению функций во всем интервале. Выполнение требований в интервале

должно гарантировать достаточную эффективность комплекса во всем диапазоне;

- *экстремальный прием дискретизации*, ориентированный на критический случай, т. е. на самое неблагоприятное сочетание условий и параметров БИИМК, основывается на подборе таких сочетаний условий и параметров, в которых эксплуатация комплекса гарантирует возможность его применения во всех других вероятных условиях;

- прием дискретизации, ориентированный на наиболее вероятные условия, предполагает задание требований, включающих наиболее вероятные комбинации условий.

Среди исходных могут быть требования, принадлежащие любому подразделу технического задания. Но, прежде всего, в их числе должны быть требования по назначению разрабатываемого комплекса. В работе [2] предлагаются методы синтеза, декомпозиции, отбора и оптимизации требований по назначению сложной технической системы.

Перед применением методов синтеза составляющие требований подвергаются упорядочению, дискретизации и кодированию. Формализованные исходные данные сводятся в таблицы или записываются в память ЭВМ.

Исходные данные анализируются в целях выявления и описания связей между ними. При этом устанавливаются совместимые (сочетающиеся) и несовместимые составляющие, виды связи, наиболее вероятные и экстремальные сочетания составляющих и комбинации составляющих требований, которые можно отбросить. Например, цель Π_1 совместима с объектом A_1 , с исходными состояниями $\Gamma_1, \Gamma_5, \Gamma_{10}$. Цель Π_1 несовместима с обслуживаемым объектом A_2 и с состоянием Γ_7 (типичные динамические звенья описывают линейные элементы только 1-го и 2-го порядков).

Путем комбинирования и объединения совместимых составляющих требований в порядке, зависящем от конкретного метода синтеза, формируются производные требования и их кодовые описания.

К производным требованиям относятся подцели, производные функции, ситуации, работы, задачи комплекса, словесные части требований и конкретные требования.

Подцели — это более конкретные цели разработки системы. Различают следующие подцели:

- подцель, как элементарная функция или цель подсистемы (характерна для декомпозиции цели);

- подцель, как более конкретная цель, например производная функция из $(\Pi \times \Gamma)$ или бинарное отношение из $(\Pi \times A)$ (характерна для синтеза подцелей по закону композиции).

Заметим, что подцели образуют нечеткое подмножество Π , так как включают элементарные и производные функции [2]:

$$\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots\} \subset (\Pi \times \Gamma, \Pi \times A, \Phi),$$

где $(\Pi \times \Gamma, \Pi \times A)$ — прямые (декартовы) произведения ЭТ из подмножеств Π , A и Γ .

Например: $\Pi_1 = \Pi_1 \times \Gamma_1$ — аналитическое моделирование дифференциальных уравнений n -го порядка в форме Коши; $\Pi_2 = \Pi_1 \times \Gamma_{10}$ — аналитическое моделирование дробно-рациональных комплексных функций. Тогда $\{\Pi_1, \Pi_2\} \subset (\Pi \times \Gamma)$.

Комбинируя и объединяя совместимые элементы подмножеств Π , Γ и A из табл. 1, получим кодовые описания работ БИИМК.

Подмножество работ, для выполнения которых создается комплекс: $P = \{P_1, P_2, \dots\} \subset (\Pi \times A \times \Gamma)$.

Например: $P_5 = \Pi_2 \cup A_1 \cup \Gamma_5 = \Pi_2 \times A_1 \times \Gamma_5$ — приближенное численное моделирование линейных элементов ГТД, описанных дифференциальными уравнениями n -го порядка с переменными коэффициентами и функцией Дирака (Хевисайда) в правой части, где \cup — обозначение операции объединения ЭТ; $P_6 = \Pi_2 \times A_1 \times \Gamma_{10}$ — приближенное численное моделирование линейных элементов ГТД, описанных дробно-рациональными комплексными функциями; $P_8 = \Pi_3 \times A_1 \times \Gamma_{10}$ — аналоговое моделирование линейных элементов ГТД, описанных дробно-рациональными комплексными функциями.

Ситуации представляют собой комбинации из условий, в которых должны достигаться подцели и выполняться работы комплекса: $S = \{C_1, C_2, \dots\} \subset (Y_a \times Y_n \times Y_c)$.

Ситуациями описываются возможные варианты обстановки, в которых планируется эксплуатация будущего БИИМК. Методами синтеза кодировки ситуаций образуются путем комбинирования и объединения условий из подмножеств Y_a, Y_n, Y_c .

Коды применяемых ситуаций и сведения о неблагоприятных условиях, принадлежащих этим ситуациям, приведены в табл. 2. ЭТ, входящие в конъюнктивную часть ситуации, подлежат обязательному учету в расчетах и при испытаниях. Благоприятные и типовые ситуации используют

ся в требованиях, реализующих рекламные возможности разрабатываемого БИИМК.

Задачи, для решения (выполнения) которых разрабатывается комплекс: $E = \{E_1, E_2, \dots\} \subset (\Pi \times C, P \times C)$.

Задачи БИИМК определяют цели, которые должны достигаться из возможных исходных состояний комплекса в конкретных ситуациях. Иначе, задачи — это работы, выполняемые в определенных условиях. В простейшем случае кодировки задач получаются путем комбинирования и объединения совместимых подцелей или работ с ситуациями. Подцели (работы) и ситуации в составе задачи комплекса связаны конъюнктивно.

Например: $E_1 = P_7 \cup C_1 = \Pi_3 \times A_1 \times \Gamma_1 \times C_1 \Rightarrow \Pi_3 \wedge A_1 \wedge \Gamma_1 \wedge C_1$ — аналоговое моделирование линейных элементов ГТД, описанных дифференциальными уравнениями n -го порядка в форме Коши при ионизирующем излучении в условиях эксплуатации; $E_2 = \Pi_3 \times A_1 \times \Gamma_{10} \times C_1$ — аналоговое моделирование линейных элементов ГТД, описанных дробно-рациональными комплексными функциями при ионизирующем излучении в условиях эксплуатации.

В общем случае одной кодировке задачи может соответствовать подмножество, содержащее пустое множество, или одну, или более одной задачи. Поэтому кодировки подлежат нормативному анализу в целях раскрытия логических и комбинаторных связей и последующего отбора нормируемых задач.

Словесные части требований представляют собой короткие, четкие формулировки требований, исключающие двойное толкование и подлежащие количественному нормированию: $T_n = \{m_1, m_2, \dots\} \subset (H \times E)$.

Кодировки словесных частей требований получаются путем комбинирования и объединения задач комплекса с совместимыми наименованиями требований из подмножества H (см. табл. 1). В сочетании с количественными частями эти требования устанавливают необходимую способность разрабатываемого БИИМК к выполнению соответствующих задач. Для примера приведем формулировки двух требований с конъюнктивной связью между элементарными составляющими.

Количественным требованием называется охарактеризованная числом словесная часть требования. Решению задач количественного нормирования и оптимизации количественных частей требований посвящены работы [4–7].

Пример.

Дано: выборки элементов исходных требований (см. табл. 1) и нормируемых ситуаций и условий применения БИИМК (см. табл. 2).

Необходимо: по данным табл. 1 и 2 сформировать технические требования по назначению

■ Таблица 2. Нормируемые ситуации и условия применения комплекса

Коды ЭТ и ситуаций	Формулировка элементов требования	
Y_a	\mathcal{E}_1	В условиях проектирования
	\mathcal{E}_2	В условиях производства
	\mathcal{E}_3	В условиях эксплуатации
Y_n	L_1	Ионизирующее излучение

к подсистеме моделирования линейных элементов ГТД из состава БИИМК.

Решение. Подмножества работ, для выполнения которых создается подсистема моделирования линейных элементов ГТД, и ситуаций применения подсистемы определяются табличным методом:

	Π_1	Π_2	Π_3		$\Pi_1 \times A_1$	$\Pi_2 \times A_1$	$\Pi_2 \times A_2$	$\Pi_3 \times A_1$	$\Pi_3 \times A_2$
A_1	1	1	1	Γ_1	1	1	0	1	0
A_2	0	1	1	Γ_5	1	1	0	0	0
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Γ_7	0	0	0	0	0
L_1	0	0	1	Γ_{10}	1	1	0	1	0

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
C_1	0	0	0	0	0	0	1	1

Откуда $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8\} \subset (P_1 = \Pi_1 \times A_1 \times \Gamma_1, P_2 = \Pi_1 \times A_1 \times \Gamma_5, P_3 = \Pi_1 \times A_1 \times \Gamma_{10}, P_4 = \Pi_2 \times A_1 \times \Gamma_1, P_5 = \Pi_2 \times A_1 \times \Gamma_5, P_6 = \Pi_2 \times A_1 \times \Gamma_{10}, P_7 = \Pi_3 \times A_1 \times \Gamma_1, P_8 = \Pi_3 \times A_1 \times \Gamma_{10}); C = \{C_1\} \subset (L_1 \times \Theta_3)$.

В результате применения методов нормативного анализа определяются словесные части требований:

$m_1 = H_2 \times E_1$ — с достоверностью β_1 вероятность выполнения задачи аналогового моделирования линейных элементов ГТД, описанных дифференциальными уравнениями n -го порядка в форме Коши, при ионизирующем излучении в условиях эксплуатации должна быть не менее W_1 ;

$m_2 = H_2 \times E_2$ — с достоверностью β_2 вероятность выполнения задачи аналогового моделиро-

вания линейных элементов ГТД, описанных дробно-рациональными комплексными функциями, при ионизирующем излучении в условиях эксплуатации должна быть не менее W_2 .

В результате количественного нормирования требования по назначению к подсистеме моделирования линейных элементов ГТД имеют вид

$$T_H = \{T_1, T_2\} = \{T_1 = H_2 \times E_1 (t \leq 2 \text{ мс}) \geq 0,85, T_2 = H_2 \times E_2 (t \leq 2 \text{ мс}) \geq 0,85\},$$

где T_1, T_2 — с достоверностью 0,85 вероятность выполнения задачи аналогового моделирования линейных элементов ГТД, описанных дифференциальными уравнениями n -го порядка в форме Коши и дробно-рациональными комплексными функциями соответственно, при ионизирующем излучении в условиях эксплуатации должна быть не менее 2 мс.

Заключение

В статье изложены основной понятийный аппарат теории номенклатурного нормирования и вариант синтеза технических требований по назначению бортового информационно-измерительного и моделирующего комплекса летательного аппарата. В совокупности с методами обоснования целей создания технических систем, количественного нормирования, декомпозиции и отбора требований возможно построение в рамках САПР подсистемы формирования технического задания на разработку (модернизацию) сложных технических систем.

Литература

1. Лэффингуэлл Д., Уидриг Д. Принципы работы с требованиями к программному обеспечению. Унифицированный подход: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2002.
2. Тетерин П. Г. Основные этапы обоснования словесных частей и состава требований заказчика // Стандартизация военной техники. 1994. № 2–3.
3. Тетерин П. Г. Основные аксиомы и операции обоснования технических требований // Стандартизация военной техники. 1995. № 1–2.

4. Фендриков Н. М., Яковлев В. И. Методы расчетов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971.
5. Извеков Е. В., Каплунов Б. А. Оптимизация средств обеспечения стрельбы артиллерии. М.: Воениздат, 1979.
6. Методика выбора номенклатуры нормируемых показателей надежности технических устройств. М.: Изд-во стандартов, 1970.
7. Лобыщин В. В. Системный подход к формированию требований // Стандарты и качество. 1976. № 1.