Методология функционального моделирования сложных технических систем модульного типа

Methodology for functional modeling of complex technical systems of modular type

УДК 62-1
Получено: 14.04.2021 Одобрено: 29.04.2021 Опубликовано: 25.06.2021

Тебекин А.В.
д-р техн. наук, д-р экон. наук, профессор, почетный работник науки и техники Российской Федерации, профессор кафедры Менеджмента Московского государственного института международных отношений (Университета) МИД России,
e-mail: Tebekin@gmail.com

Tebekin A.V.
Doctor of Technical Sciences, Doctor of Economics, Professor, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor of the Department of Management of the Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs of Russia,
e-mail: Tebekin@gmail.com

Аннотация
В рамках методологии IDEF (I-CAM DEFinition или Integrated DEFinition), входящей в семейство методологий ICAM (Integrated Computer-Aided Manufacturing), предназначенной для решения задач моделирования сложных систем, рассмотрена методология функционального моделирования IDEF0 применительно к построению сложных технических систем модульного типа. Показаны особенности применения методологии функционального моделирования с помощью наглядного графического языка IDEF0 сложных технических систем модульного типа, когда моделируемая система описывается в виде набора взаимосвязанных функциональных блоков, которые при модульном принципе должны обеспечивать как возможность замещения одних модулей другими − с бо́льшими функциональными возможностями, так и возможность наращивать модули при развитии системы. Научная новизна работы заключается в обосновании методологических требований к функциональному моделированию сложных технических систем, создаваемых на основе модульного принципа.
Ключевые слова: методология, функциональное моделирование, сложные технические системы, модульный тип.

Abstract
Within the framework of the IDEF (I-CAM DEFinition or Integrated DEFinition) methodology, which is part of the ICAM (Integrated Computer-Aided Manufacturing) family of methodologies, designed for solving problems of modeling complex systems, the IDEF0 functional modeling methodology is considered in relation to the construction of complex technical systems of a modular type. The features of the application of the methodology of functional modeling using the visual graphical language IDEF0 of complex technical systems of a modular type are shown, when the modeled system is described as a set of interconnected functional blocks, which, in the modular principle, should provide both the possibility of replacing some modules with others - with great functionality, and the possibility build up modules as the system develops. The scientific novelty of the work lies in the substantiation

of the methodological requirements for the functional modeling of complex technical systems created on the basis of a modular principle.
Keywords: methodology, functional modeling, complex technical systems, modular type.

Введение

Ускорение научно-технического прогресса неизменно приводит к сокращению жизненных циклов новой техники, новых технологических процессов и т.д. при одновременном расширении спектра предоставляемых ими возможностей (функциональных, эксплуатационных и пр.) [11].

Рост ассортимента продукции новой техники и расширение состава технологий в условиях постиндустриальной экономики приводит к постепенному переходу от массового и крупносерийного производства через среднесерийное производство к мелкосерийному и единичному производству [14] под запросы конкретных потребителей (кастомизация [2]).

Кастомизация как индивидуализация продукции под заказы конкретных потребителей путём внесения функциональных, конструктивных и других изменений, как правило, на завершающих стадиях производственного цикла, в условиях постиндустриальной экономики, приобретает все более массовый характер.

Таким образом, при переходе от индустриальной к постиндустриальной экономике происходит переход от массового и крупносерийного производства однотипной серийной продукции к массовой кастомизации, когда в производство продукции закладывается возможность поменять часть ее свойств исходя из запросов конкретных потребителей.

Осуществлять такую кастомизацию сложной технической продукции во многих случаях целесообразно с использованием модульного принципа, успешно реализованным Майклом Деллом в модели доступа к потребителю через особые каналы в компании Dell Computer [12].

В этой связи представляет интерес рассмотрение проблемы функционального моделирования сложных технических систем, создаваемых на основе модульного принципа.

Цель исследования

Целью представленной работы является исследование методологии функционального моделирования сложных технических систем, создаваемых на основе модульного принципа.

Методологическая база исследований

Методологическую базу исследований составили руководящие документы [3, 4, 10], а также научные труды по методологии функционального моделирования таких авторов, как Бистерфельд О.А. [6], Вавилин А.В., Киселев Д.Ю., Киселев Ю.В. [1], Верников Г. [7], Дворников А. [8], Марка Д.А., Мак Гоуэн К. [9] и др.

Методологическую базу исследований также составили авторские наработки по методологии функционального моделирования [13, 15].

Основное содержание исследований

При исследовании методологии функционального моделирования сложных технических систем модульного типа за основу были приняты концептуальные положения методологии IDEF0 (рис. 1) [10], приложенные к сложным техническим системам, построенным по модульному принципу, означающему построение сложных технических систем с различными характеристиками путем компоновки их из типовых модулей ограниченной номенклатуры [5].

Рис. 1. Концептуальные положения методологии IDEF0 [10]

В более подробном определении модульный принцип означает особый способ построения сложных технических систем, предусматривающий подчинение их функциональных возможностей и размеров проектным модулям и / или обеспечение возможности комплектования разнообразных, сложных, нестандартных технических систем с большим различием характеристик из небольшого, экономически обоснованного количества типов и типоразмеров одинаковых первичных (типовых или стандартных) модулей.

В этой связи представляет интерес рассмотрение характеристик первичного модуля сложной технической системы (рис. 2) [10].

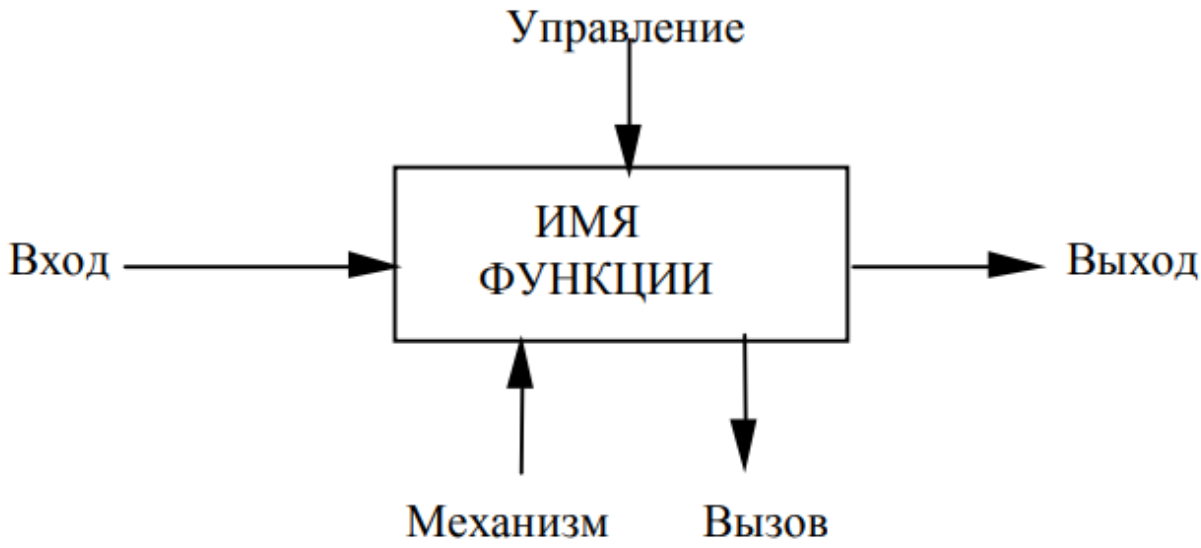

Рис. 2. Схема первичного модуля сложной технической системы в соответствии с методологией IDEF0 [10]

Рассмотрим составляющие схемы первичного модуля сложной технической системы в соответствии с методологией IDEF0 (рис. 2).

Под входом (рис. 2) в данном рассмотрении понимается потребность (X) пользователя сложной технической системы в выполнении требуемой i-й функции (X_i).

Под именем функции (рис. 2) понимается i-й модуль сложной технической системы (Y_i), реализующий функции i-ю потребность пользователя (X_i).

Под управлением (рис. 2) понимается набор управляющих воздействий (Q_i) на i-й модуль сложной технической системы (Y_i), реализующий функции i-ю потребность пользователя (X_i).

Под механизмом (рис. 2) понимается набор ресурсных и инструментальных воздействий (Z_i), обеспечивающих преобразование в i-м модуле сложной технической системы (Y_i) входного воздействия (X_i).

Под вызовом (рис. 2) понимается ответная реакция (W_i) модуля сложной технической системы (Y_i) на воздействие механизма (Z_i).

Под выходом (рис. 2) понимается отражение степени ожиданий пользователя (E_i) от выполнения i-м модулем сложной технической системы (Y_i) заданной потребности (X_i).

Модельная интерпретация схемы первичного модуля сложной технической системы, построенной в соответствии с методологией IDEF0 (рис. 2) приведена на рис. 3.

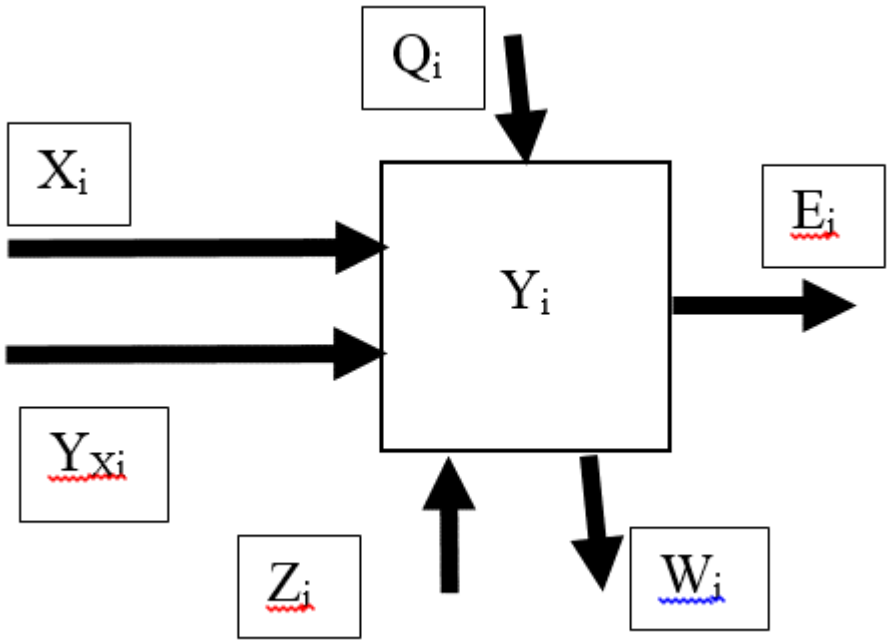

Рис. 3. Модельная интерпретация схемы первичного модуля сложной технической системы, построенной в соответствии с методологией IDEF0

Если для сложной технической системы на основе базовой комплектации традиционно используется подстройка системы (Y_{Xi}) – см. рис. 3, под конкретный запрос потребителей (X_i), то для сложной технической системы модульного типа задача упрощается набором (множеством) типовых модулей $\{Y_i\}$, призванных при кастомизации обеспечить удовлетворение множества запросов $\{X_i\}$ потребителей (рис. 4).

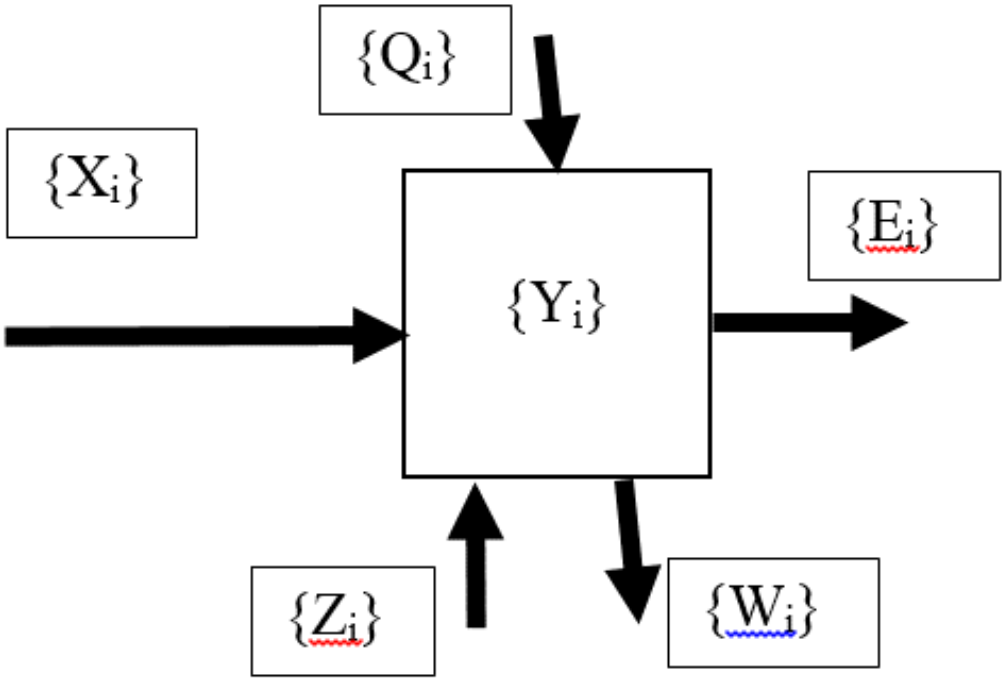

Рис. 4. Модельная интерпретация схемы сложной технической системы модульного типа, построенной в соответствии с методологией IDEF0

Сформулируем методологические требования к модели функционального моделирования сложной технической системы модульного типа, построенной в соответствии с идеологией IDEF0 (рис. 4).

Во-первых, каждый выход (реализуемая функция) сложной технической системы (E_i) должен иметь максимальную степень подобия i-му запросу на выполнение функции потребителя (X_i), преобразуемый в сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$:

$E_i \sim X_i$ (1).

Во-вторых, множество выходов (реализуемых функций) сложной технической системы $\{E_i\}$ должно обеспечивать необходимый и достаточный уровень покрытия множества запросов потребителей $\{X_i\}$, преобразуемых в сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$:

$\sum E_i \rightarrow \sum X_i$ (2).

В-третьих, наборы управляющих воздействий $\{Q_i\}$ на сложную техническую систему модульного типа $\{Y_i\}$, с одной стороны, должны обеспечивать требуемую специализацию при выполнении конкретных запрашиваемых функций (X_i), с другой стороны, наборы управляющих воздействий $\{Q_i\}$ должны быть максимально унифицированы:

$\cap Y_i \rightarrow \min$ (3),

$U Y_i \rightarrow \max$ (4).

В-четвертых, механизмы воздействий на сложную техническую систему модульного типа $\{Y_i\}$ как наборы ресурсных и инструментальных воздействий $\{Z_i\}$, обеспечивающие преобразование в сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$ множества входных воздействий $\{X_i\}$, должны обеспечивать необходимую ресурсную достаточность $\{R_i\}$ и инструментальное разнообразие $\{I_i\}$ используемых механизмов:

$\{R_i\} \rightarrow \{R_i\}^*$ (5),

$\{I_i\} \rightarrow \{I_i\}^*$ (6),

где $\{R_i\}$ – фактический уровень ресурсной достаточности множества механизмов $\{Z_i\}$ сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$,

$\{R_i\}^*$ – необходимый уровень ресурсной достаточности множества механизмов $\{Z_i\}$ сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$,

$\{I_i\}$ – фактический уровень инструментального разнообразия множества механизмов $\{Z_i\}$ сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$,

$\{I_i\}^*$ – необходимый уровень инструментального разнообразия множества механизмов $\{Z_i\}$ сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$.

В-пятых, механизмы воздействий на сложную техническую систему модульного типа $\{Y_i\}$ как наборы ресурсных и инструментальных воздействий $\{Z_i\}$, должны обеспечивать необходимую экономическую целесообразность и эффективность $P(Z_i)$ их использования:

$P(\{Z_i\}) \geq P^*(\{Z_i\})$ (7),

где $P(Z_i)$ – фактическая эффективность использования механизмов $\{Z_i\}$ воздействий на сложную техническую систему модульного типа $\{Y_i\}$, определяемая из соотношения:

$P(\{Z_i\})=S(\{Z_i\})/L(\{Z_i\})$ (8),

$S(\{Z_i\})$ – функциональный эффект от использования множества механизмов $\{Z_i\}$ сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$,

$L(\{Z_i\})$ – затраты на использование множества механизмов $\{Z_i\}$ сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$,

$P^*(\{Z_i\})$ – требуемая эффективность использования множества механизмов $\{Z_i\}$ сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$, определяемая из соотношения, аналогичного соотношению (8).

В-шестых, набор вызовов $\{W_i\}$ как ответных реакций сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$ на воздействие механизмов $\{Z_i\}$ должен обладать необходимым и достаточным уровнем информативности:

$\{W_i\} \rightarrow \{W_i\}^*$ (8),

где $\{W_i\}$ – фактический уровень информативности вызовов $\{W_i\}$ как ответных реакций сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$ на воздействие механизмов $\{Z_i\}$;

$\{W_i\}^*$ – необходимый уровень информативности вызовов $\{W_i\}$ как ответных реакций сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$ на воздействие механизмов $\{Z_i\}$.

В-седьмых, сложная техническая система модульного типа $\{Y_i\}$ должна удовлетворять требованиям необходимой функциональной полноты $G(\{X_i\})$, эксплуатационной надежности $N(\{Y_i\})$, экономической эффективности и целесообразности $P(\{Y_i\})$:

$F[G(\{X_i\}), N(\{Y_i\}), P(\{Y_i\})] \rightarrow F^*[G(\{X_i\}), N(\{Y_i\}), P(\{Y_i\})]$ (9),

где $F[G(\{X_i\}), N(\{Y_i\}), P(\{Y_i\})]$ – фактический уровень функциональной полноты $G(\{X_i\})$, эксплуатационной надежности $N(\{Y_i\})$, экономической эффективности и целесообразности $P(\{Y_i\})$ сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$;

$F^*[G(\{X_i\}), N(\{Y_i\}), P(\{Y_i\})]$ – необходимый уровень функциональной полноты $G(\{X_i\})$, эксплуатационной надежности $N(\{Y_i\})$, экономической эффективности и целесообразности $P(\{Y_i\})$ сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$.

В-восьмых, функциональная полнота $G(\{X_i\})$, обеспечиваемая сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$, должна удовлетворять требованиям необходимости и достаточности выполняемых функций:

$G(\{X_i\}) \rightarrow G^*(\{X_i\})$ (10),

где $G(\{X_i\})$ – фактический уровень функциональной полноты, обеспечиваемой сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$;

$G^*(\{X_i\})$ – требуемый уровень функциональной полноты, обеспечиваемой сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$.

$\{W_i\}^*$ – необходимый уровень информативности вызовов $\{W_i\}$ как ответных реакций сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$ на воздействие механизмов $\{Z_i\}$.

В-девятых, эксплуатационная надежность $N(\{Y_i\})$, обеспечиваемая сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$, должна удовлетворять следующим требованиям.

Безотказность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$ должна быть не ниже заданного уровня, рассчитываемого относительно базовой сложной технической системы (не модульного типа):

$B(\{Y_i\}) \geq B^*(\{Y_i\})$ (11),

где $B(\{Y_i\})$ – фактическая безотказность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$,

$B^*(\{Y_i\})$ − требуемая безотказность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$.

Сохраняемость сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$ должна быть не ниже заданного уровня, рассчитываемого относительно базовой сложной технической системы (не модульного типа):

$C(\{Y_i\}) \geq C^*(\{Y_i\})$ (12),

где $C(\{Y_i\})$ – фактическая сохраняемость сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$,

$C^*(\{Y_i\})$ − требуемая сохраняемость сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$.

Долговечность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$ должна быть не ниже заданного уровня, рассчитываемого относительно базовой сложной технической системы (не модульного типа):

$D(\{Y_i\})\geq D^*(\{Y_i\})$ (13),

где $D(\{Y_i\})$ – фактическая долговечность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$,

$D^*(\{Y_i\})$ − требуемая долговечность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$.

Ремонтопригодность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$ должна быть не ниже заданного уровня:

$\Delta T(\{Y_i\})\leq\Delta T^*(\{Y_i\})$ (14),

где $\Delta T(\{Y_i\})$ – фактическое время ремонта сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$,

$\Delta T^*(\{Y_i\})$ − требуемое время ремонта сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$.

В-десятых, эффективность сложной технической системой модульного типа $P\{Y_i\}$ должна обеспечивать необходимую экономическую целесообразность и эффективность $P(\{Y_i\})$ ее использования:

$P(\{Y_i\})\geq P^*(\{Y_i\})$ (15),

где $P(\{Y_i\})$ – фактическая эффективность сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$, определяемая из соотношения:

$P(\{Y_i\})= G(\{X_i\})*N(\{Y_i\})/L(\{Y_i\})$ (16),

$L(\{Y_i\})$ – затраты на создание и эксплуатацию сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$;

$P^*(\{Y_i\})$ – требуемая эффективность сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$, определяемая из соотношения аналогичного соотношению (16).

Обсуждение результатов и выводы

Таким образом, результаты исследования методологии функционального моделирования сложных технических систем, создаваемых на основе модульного принципа, позволяют сформулировать следующие выводы.

Во-первых, каждый выход (реализуемая функция) сложной технической системы (E_i) должен иметь максимальную степень подобия i-му запросу на выполнение функции потребителя (X_i), преобразуемый в сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$.

Во-вторых, множество выходов (реализуемых функций) сложной технической системы $\{E_i\}$ должно обеспечивать необходимый и достаточный уровень покрытия множества запросов потребителей $\{X_i\}$, преобразуемых в сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$.

В-третьих, наборы управляющих воздействий $\{Q_i\}$ на сложную техническую систему модульного типа $\{Y_i\}$, с одной стороны, должны обеспечивать требуемую специализацию при выполнении конкретных запрашиваемых функций (X_i), с другой стороны, наборы управляющих воздействий $\{Q_i\}$ должны быть максимально унифицированы.

В-четвертых, механизмы воздействий на сложную техническую систему модульного типа $\{Y_i\}$ как наборы ресурсных и инструментальных воздействий $\{Z_i\}$, обеспечивающие преобразование в сложной технической системе модульного типа $\{Y_i\}$ множества входных воздействий $\{X_i\}$, должны обеспечивать необходимую ресурсную достаточность $\{R_i\}$ и инструментальное разнообразие $\{I_i\}$ используемых механизмов.

В-пятых, механизмы воздействий на сложную техническую систему модульного типа $\{Y_i\}$ как наборы ресурсных и инструментальных воздействий $\{Z_i\}$, должны

обеспечивать необходимую экономическую целесообразность и эффективность $P(Z_i)$ их использования.

В-шестых, набор вызовов $\{W_i\}$ как ответных реакций сложной технической системы модульного типа $\{Y_i\}$ на воздействие механизмов $\{Z_i\}$ должен обладать необходимым и достаточным уровнем информативности.

В-седьмых, сложная техническая система модульного типа $\{Y_i\}$ должна удовлетворять требованиям необходимой функциональной полноты $G(\{X_i\})$, эксплуатационной надежности $N(\{Y_i\})$, экономической эффективности и целесообразности $P(\{Y_i\})$.

В-восьмых, функциональная полнота $G(\{X_i\})$, обеспечиваемая сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$, должна удовлетворять требованиям необходимости и достаточности выполняемых функций.

В-девятых, эксплуатационная надежность $N(\{Y_i\})$, обеспечиваемая сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$, должна удовлетворять следующим требованиям: безотказность, сохраняемость и долговечность сложной технической системой модульного типа $\{Y_i\}$ должна быть не ниже заданного уровня, рассчитываемого относительно базовой сложной технической системы (не модульного типа).

В-десятых, эффективность сложной технической системой модульного типа $P(\{Y_i\})$ должна обеспечивать необходимую экономическую целесообразность и эффективность $P(\{Y_i\})$ ее использования.

В-одиннадцатых, для обеспечения эффективности сложной технической системой модульного типа $P(\{Y_i\})$ целесообразно при производстве модулей Y_i использовать метод FMR-анализа, выделяя наиболее часто используемые модули (F) при кастомизации, менее часто используемые модули (M) и редко востребованные модули (R).

Литература

1. Функциональное моделирование на базе стандарта IDEF0: метод. Указания / сост. Д.Ю. Киселев, Ю.В. Киселев, А.В. Вавилин. – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 20 с.
2. Anderson David M. «Build-to-Order & Mass Customization, the Ultimate Supply Chain and Lean Manufacturing Strategy for Low-Cost On-Demand Production without Forecasts or Inventory». 2008, 520 pages, CIM Press.
3. Federal Information Processing Standards Publication 183. Integration definition for function modeling (IDEFO). Dec. 1993.
4. ISO/IEC/IEEE 31320-1-2012. Information technology - Modeling Languages - Part 1: Syntax and Semantics for IDEF0.
5. *Базров Б.М.* Модульная технология в машиностроении/ Б.М. Базров. – Москва: Машиностроение, 2001. 368 с.
6. *Бистерфельд О.А.* Методология функционального моделирования IDEF0: учебно-методическое пособие / О.А. Бистерфельд; Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. — Рязань, 2008. — 48 с.
7. Верников Г. Основные методологии обследования организаций. Стандарт IDEF0. [Электронный ресурс]. –Режим доступа: http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/ca/idefo.htm, свободный
8. *Дворников А.* IDEF0 как инструмент моделирования процессов // Авант Партнер, 2005. – No 22 (79).
9. *Дэвид А.* Марка и Клемент МакГоуэн Методология структурного анализа и проектирования SADT. http://dit.isuct.ru/IVT/BOOKS/CASE/case8/sadt_index.htm

10. РД IDEF 0 — 2000: методология функционального моделирования idef0. руководящий документ. Госстандарт России Москва, Ипк издательство стандартов, 2000 – 75 с.

11. *Тебекин А.В.* Инновационный менеджмент. Учебник для бакалавров / Москва, 2020. Сер. 58 Бакалавр. Академический курс (2-е изд., пер. и доп.).

12. *Тебекин А.В.* Методы принятия управленческих решений. Учебник / Москва, 2020. Сер. 76. Высшее образование (1-е изд.)

13. *Тебекин А.В.* Моделирование систем управления деятельностью таможенных органов с использованием методологии моделирования IDEF. // Вестник Российской таможенной академии. – 2015. – № 4. – С. 96-103.

14. *Тебекин А.В., Тебекин П.А., Егорова А.А.* Технологические трансформации XXI века как индуцирующий вектор перехода к новому качеству производства. // Теоретическая экономика. – 2021. – № 1 (73). – С. 42-53.

15. *Тебекин А.В., Петров В.С.* Использование методологии моделирования IDEF при формировании структурно-параметрической модели реализации технологий обеспечения эффективного развития промышленных предприятий в условиях постиндустриальной экономики. // Транспортное дело России. – 2017. – № 4. – С. 43-49.

16. *Тебекин А.В., Сомов Ю.И.* Моделирование управления деятельностью таможенных органов с использованием методологии IDEF1. // Вестник Российской таможенной академии. – 2016. – № 1. – С. 135-142.