

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 621.391

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-586-594

Автоматизация управления процессом создания сложных радиотехнических систем

Н.Л. Дембицкий, А.М. Петраков, В.А. Шевцов

*Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), г. Москва, Россия*

nio4@mai.ru

Необходимость новых подходов к созданию перспективных радиотехнических систем (РТС) обусловлена возникшим противоречием между повышением требований к их характеристикам и жесткими ограничениями на временные и материальные ресурсы. Управление должно сочетать параметрическую и структурную оптимизацию РТС с возможностями сокращения сроков разработки и объема финансирования на 30–50 %. Цель работы – информационно-алгоритмическая поддержка управления процессом создания РТС, обеспечивающая снижение рисков невыполнения технического задания при сокращении отведенных сроков путем применения математического моделирования и автоматизированных процедур управления на всех этапах жизненного цикла изделия. Выполнена алгоритмизация процедур оптимального перераспределения ресурсов, времени, изменения интенсивности работ на отдельных этапах. За счет повышения конструктивной, технологической и производственной готовности изделий значительно снижаются риски нарушения графика работ при ограниченных ресурсных и временных затратах. Разработанное программно-информационное обеспечение позволяет повысить эффективность централизованного управления проектированием РТС, получать объективные оценки возможностей выполнения проекта, рационально использовать имеющийся научно-технологический задел, оперативно определять «узкие» участки работы, осуществлять управление и оптимизацию процесса проектирования РТС.

Ключевые слова: радиотехнические системы; автоматизация управления проектами; риски; программно-информационное обеспечение

Для цитирования: Дембицкий Н.Л., Петраков А.М., Шевцов В.А. Автоматизация управления процессом создания сложных радиотехнических систем // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 6. – С. 586–594. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-586-594

Automation of Control over Process of Creating Complex Radio Engineering Systems

N.L. Dembitsky, A.M. Petrakov, V.A. Shevtsov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

nio4@mai.ru

Abstract: The process of creating the perspective radio engineering systems (RES) is connected not only with the search for original ideas and solutions, but, also, with the evaluation of their efficiency from positions of the engineering, technological and industrial realizability with specified resource and time restrictions. It includes the stages from the technical-economical proof and preparation of the design task to testing the samples of items and the delivery to a customer. For a successful fulfillment of the design life cycle the control and management over the process, which must take into consideration the variety of factors, influencing upon the quality of solutions being taken, are necessary. Besides, it is required to process and generalize the information vast volume. The purpose of this work is the information-algorithmic support for managing the process of creating the radio engineering systems (RES), the reduction of the risks of non-fulfillment of the technical assignment, the design time reduction by applying the mathematical modeling and the automated procedures of control at all stages of the item life cycle. The algorithmization of procedures for the optimal redistribution of resources, time and the changes of the work intensity at individual stages has been performed. Due to an increase of design, technological and production readiness of the items the risks of the work schedule violation with restricted resource and time expenses are significantly reduced.

Keywords: radio engineering systems; automation of project management; risks; software and information support

For citation: Dembitsky N.L., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. Automation of Control over Process of Creating Complex Radio Engineering Systems. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 6, pp. 586–594. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-586-594

Введение. Создание перспективных радиотехнических систем (РТС) – сложный процесс, который связан не только с поиском оригинальных идей и решений, но и с оценкой их эффективности с позиций технической, технологической и производственной реализуемости при заданных ресурсных и временных ограничениях. Он включает этапы от технико-экономического обоснования и подготовки проектного задания до испытания образцов изделий и передачи их заказчику. Для успешного выполнения жизненного цикла проекта необходимы постоянный контроль и управление процессом, которые должны учитывать все разнообразие факторов, влияющих на качество принимаемых решений. При этом требуется обрабатывать и обобщать огромный объем информации.

В современных условиях функции управления процессом создания РТС невозможно осуществлять без применения программно-информационных средств. Существующие в настоящее время автоматизированные системы решают ряд важнейших задач управления проектированием: координация работы САПР различного назначения [1];

управление проектными данными [2]; планирование ресурсов предприятия [3] и производства. Необходимость новых подходов к созданию перспективных РТС обусловлена возникшим противоречием между повышением требований к их характеристикам и жесткими ограничениями на временные и материальные ресурсы. Управление должно сочетать параметрическую и структурную оптимизацию РТС с возможностями сокращения сроков разработки и объема финансирования на 30–50%.

Цель настоящей работы – информационно-алгоритмическая поддержка управления процессом создания РТС, обеспечивающая снижение рисков невыполнения технического задания при сокращении отведенных сроков путем применения математического моделирования и автоматизированных процедур управления на всех этапах жизненного цикла изделия. Разработанное программно-информационное обеспечение позволяет повысить эффективность централизованного управления проектированием РТС, получить объективные оценки возможностей выполнения проекта, рационально использовать имеющийся научно-технологический задел, оперативно определить «узкие» участки работы, осуществлять управление и оптимизацию процесса проектирования РТС.

Методы управления процессами проектирования сложных радиотехнических систем. Системы управления проектами начали развиваться после широкого внедрения сетевых информационных технологий, которые позволили объединять коллективы разработчиков проектов на основе применения интегрированных баз данных [4]. Функциями систем управления проектом являются [5] слежение за состоянием проекта; координация и синхронизация параллельно выполняемых процедур; управление методологией проектирования. Современные системы управления проектированием широко распространены и востребованы в областях проектирования сложных технических объектов.

Характеристики процесса проектирования можно классифицировать по конструкторско-техническим, технологическим и производственным факторам. Общее количество факторов, влияющих на процесс создания РТС, велико, и количественно оценить их значимость практически невозможно. Поэтому целесообразно скомпоновать эти факторы в единую модель с тем, чтобы получить количественную оценку их влияния на процесс создания РТС нового поколения. Перечислим особенности принятия решений при проектировании РТС.

1. Существует ряд факторов, влияющих на качество принимаемых решений, выбор которых, по существу, является эвристическим [6], так как отсутствует возможность накопления достоверной статистики. Поэтому для вновь разрабатываемых компонентов РТС не удастся построить адекватную модель оценки эффективности процесса проектирования [7].

2. Применение экспертного анализа для описания природы неопределенности принятия проектных решений также представляется малоцелесообразным из-за низкой точности и субъективности оценок.

3. Возникает неопределенность в прогнозировании параметров процесса проектирования РТС, так как он носит творческий характер.

4. Процесс принятия управленческих решений на всех уровнях руководства проектом должен иметь высокую оперативность и давать возможность на любом этапе адекватно и объективно оценивать состояние разработок.

Перечисленные особенности стимулируют поиск новых подходов к математическому и программному обеспечению управления проектами. В итоге разработчика интересует возможность создания РТС с заданными тактико-техническими характеристиками за определенное время при минимальном использовании выделенных ресурсов.

Как показано в работе [8], в этих условиях в качестве интегральной характеристики эффективности процесса проектирования целесообразно применять вероятность нарушения графика разработки (риск) как отдельных компонентов, так и всей РТС.

Рассматриваемый подход учитывает специфику задачи, а именно: иерархическую конфигурацию РТС; привязку исходных данных к жизненному циклу создания компонентов РТС; возможность контроля готовности компонентов на всех этапах жизненного цикла (от модели до образцов изделия).

Количественная модель оценки готовности компонента. В процессе создания сложной РТС ее отдельные компоненты и комплексы проходят следующие стадии разработки [9]: техническое задание; техническое предложение; эскизный проект; технический проект; разработка рабочей документации. Для получения показателя готовности изделия необходимо контролировать и выявлять характеристики, которые должны быть обеспечены на каждом этапе разработки изделия [10–14]. Сформировав перечни характеристик каждого этапа, можно приступить к оценке готовности изделия.

Предположим, что на i -м этапе для полной готовности компонента РТС необходимо обеспечить выполнение требований разработки или производства на множестве характеристик χ_i . По каждой характеристике $\chi_{ij} \subset \chi_i$ i -го этапа получим оценку уровня ее готовности v_{ij} , $0 \leq v_{ij} \leq 1$. Сложив полученные оценки, найдем оценку готовности изделия на i -м этапе:

$$k_{ri} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} v_{ij} \eta_{ij} \varepsilon_{ij}}{n_i},$$

где η_{ij} – коэффициент, учитывающий степень влияния характеристики на результаты процесса разработки; ε_{ij} – коэффициент сложности обеспечения требуемых значений характеристики.

Предложенная модель дает возможность получать требуемые оценки готовности на всех этапах жизненного цикла создания РТС и ее компонентов, так как на каждом этапе есть набор характеристик, определяющих готовность к получению необходимых результатов. Характеристики могут относиться к технологиям производства, обеспечению параметров устройств и систем, организации производственных процессов, ресурсному обеспечению и т.д. Таким образом, представленная модель универсальна с точки зрения методик для оценки готовности изделия и выполнения требований различных этапов создания РТС.

Статистическая модель оценки готовности компонентов. Недостатком количественной модели оценки готовности является отсутствие четких аналитических связей уровня параметрической готовности с необходимыми временными затратами для доведения изделия до полной готовности. Для получения необходимой информации об этих связях проанализируем аналоги разрабатываемых устройств и систем.

При разработке проекта новой РТС могут быть использованы как готовые, полностью конструктивно-технологически отработанные устройства, блоки, модули, так и новые, находящиеся на различных стадиях разработки. Использование готовых компонентов практически не приведет к дополнительным затратам при создании РТС. Поэтому основные факторы, влияющие на процесс создания РТС, связаны с использованием новых или находящихся в разработке компонентов.

Обозначим множество всех компонентов разрабатываемой РТС как $\widehat{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_N\}$. Выделим в этом множестве подмножество $\widehat{M}_r \subset \widehat{M}$ полностью

готовых компонентов. Тогда множество неготовых компонентов, проектирование которых продолжается, $\widehat{M}_n = \widehat{M} \setminus \widehat{M}_r$ определяет вновь разрабатываемые и модернизируемые компоненты, которые находятся на разных стадиях жизненного цикла разработки. Готовность компонента определяется этапом разработки, на котором он находится. Поскольку в конечном счете для проектировщика важно выполнение требований технического задания в срок, то величину k_r целесообразно использовать для количественной оценки группы факторов, определяющих эффективность использования компонента M в структуре РТС. Такую обобщенную оценку можно получить на основе анализа трудозатрат.

В качестве дополнительной оценки степени готовности проектируемого компонента используется функция распределения относительных трудозатрат (относительной трудоемкости), которая показывает плотность распределения трудозатрат по всему жизненному циклу создания компонента:

$$\sigma(t) = \partial\Theta(t) / \Theta_{\text{пр}} \partial t,$$

где $\Theta(t)$ – трудоемкость выполненных работ за время t ; $\Theta_{\text{пр}}$ – общая трудоемкость проектирования компонента.

В любой момент времени t' текущий уровень готовности $k_r(t') = \int_0^{t'} \sigma(t) dt$, а при $t' = T_n$ уровень готовности $k_r(t_n) = 1$, где T_n – период выполнения полного цикла работ по созданию компонента. На рис.1 показаны графики плотности распределения относительных трудозатрат по этапам разработки компонента и функции готовности для двух вариантов процесса разработки изделия. При $t' = T_n$ наступает полная готовность.

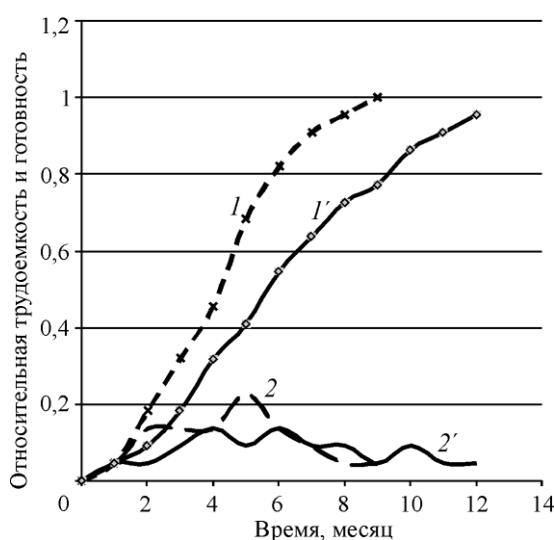


Рис.1. Графики плотности распределения функции готовности 1 и 2 компонента (кривые 1 и 1') и относительной трудоемкости 1 и 2 по этапам разработки модуля (кривые 2 и 2')

Fig.1. Graphs of the density of component's readiness 1 and 2 function (curves 1 and 1') and the labor-intensity 1 and 2 distribution for the stages of module development (curves 2 and 2')

Относительных трудозатрат по этапам разработки компонента и функции готовности для двух вариантов процесса разработки изделия. При $t' = T_n$ наступает полная готовность.

Очевидно, что функция готовности имеет накопительный характер от этапа к этапу. По мере приближения к завершающим этапам она стремится к 1. Функция распределения относительной трудоемкости является результатом обработки статистических данных о распределении трудоемкости работ для аналогов проектируемого компонента согласно положениям теории подобия. При изменении сложности изделия относительно аналога график плотности распределения работ сужается или расширяется (соответственно) вдоль оси времени. Функция готовности также изменяется. В случае уменьшения сложности она становится круче. В случае усложнения она становится более полой, и временной интервал до наступления полной готовности увеличивается.

Программное обеспечение управления рисками. Рассмотренные модели использованы для расчета готовности компонентов РТС при планировании работ (рис.2). Зная распределение трудоемкости для аналогов, можно спрогнозировать распределение трудоемкости по шагам и этапам выполнения работ для проектируемого компонента.

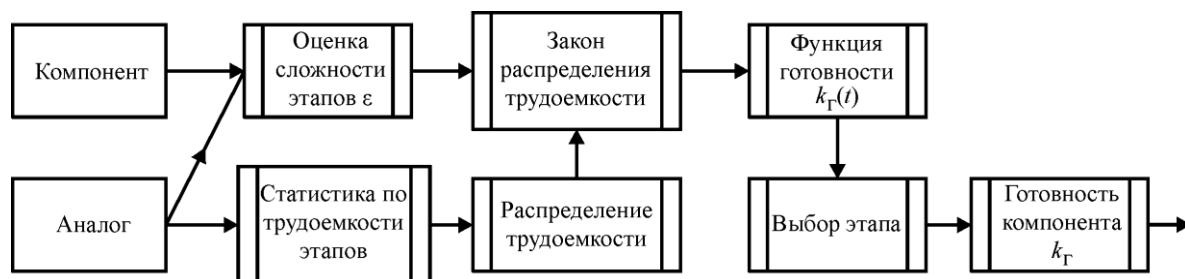


Рис.2. Алгоритм определения готовности с помощью статистической модели
 Fig.2. Algorithm for determining readiness using a statistical model

Общий подход к задаче определения рисков нарушения графика разработки строится по принципу распределения процесса проектирования по этапам. Интенсивность работ внутри этапа считается постоянной величиной. Накопленный опыт проектирования позволяет заранее оценивать распределение трудоемкости этапов разработки в зависимости от типов компонентов. Например, для программных модулей такое распределение смещается к этапам алгоритмической и программной разработки. Для устройств с высокой долей технологической составляющей (например, приемопередающих модулей) изготовление опытных и серийных образцов потребует больших усилий и материальных ресурсов.

Риск нарушения графика работ (РНГР) этапа вычисляется по формуле

$$\rho = e^{-\lambda(t_n + K_r t_p)},$$

где λ – интенсивность процесса разработки; t_n – плановые сроки выполнения разработки на выбранном этапе; t_p – временной интервал выполнения этапа разработки компонента по данным аналога; K_r – уровень готовности на начало этапа.

На рис.3 представлена структура метода управления рисками, где двойной рамкой выделены управляющие факторы. Уровень готовности задает состояние разработки изделия на начало этапа и может быть рассчитан по рассмотренным методикам. Время разработки является функцией времени разработки аналога и технической сложности изделия. Интенсивность оценивает объем полученных результатов разработки за интервал времени на основе данных аналога и находится в прямой зависимости от выделенных на разработку ресурсов (количество специалистов, уровень автоматизации, аппаратное и технологическое оснащение и т.д.).

Временной интервал t_p полного цикла разработки компонента по данным аналога определяется сведениями о предшествующих разработках и сравнением аналога с разрабатываемым устройством. Исходными данными расчета являются время разработки аналога t_a и коэффициент сложности ε компонента относительно аналога. Зная время разработки аналога и относительный коэффициент сложности, можно оценить общее время разработки нового изделия: $t_p = t_a \varepsilon$.

Методика определения уровня готовности зависит от этапа проектирования и типа решаемой задачи. Для оценки существующих и проектируемых образцов на этапах эскизного и технического проектирования лучше применять количественную модель расчета уровня готовности, так как в этом случае важнейшим фактором является рассогласование функциональных характеристик аналога или проектируемого устройства с их теоретической моделью. При оценке уровня готовности аналогов компонентов на этапах подготовки технического задания и технического предложения лучше воспользоваться оценкой готовности по обобщенным поэтапным показателям, которые характеризуют готовность подразделений предприятия на разных этапах создания компонентов.

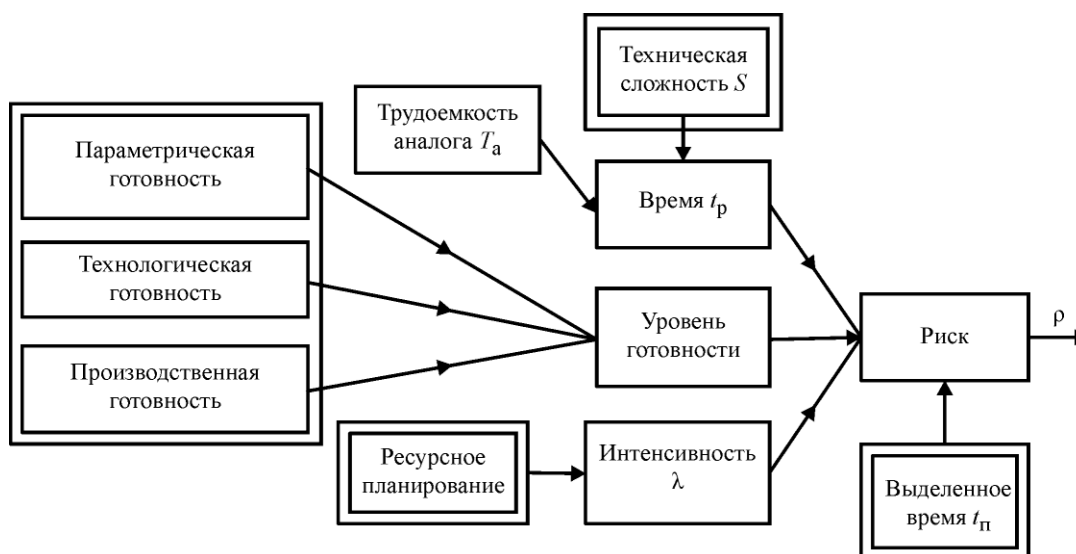


Рис.3. Метод расчета риска невыполнения графика работ
 Fig.3. Method for calculating the risk of non-fulfillment of the work schedule

Одним из главных факторов, влияющим на темпы создания изделия, является интенсивность разработки λ . Для ее определения воспользуемся формулой вычисления РНГР аналога:

$$\rho_a = e^{-\lambda_a t_a},$$

где λ_a – интенсивность процесса разработки аналога компонента. Задав вероятность получения результата для аналога (например, на уровне 6σ), можно рассчитать показатель интенсивности процесса:

$$\lambda_a = -\ln \rho_a / t_a.$$

Относительно значения интенсивности λ_a можно определять меру воздействия на проектные работы и рассчитывать требуемую интенсивность $\lambda = \gamma \lambda_a$, которая варьируется относительно интенсивности разработки аналога λ_a с помощью коэффициента γ . Коэффициент γ определяет уровень изменения интенсивности работ по проекту для компонентов на разных этапах для обеспечения необходимого уровня РНГР процесса при разработке компонентов РТС на различных этапах.

Планируемое время разработки $t_{\text{п}}$ является фактором, увеличение которого приводит к уменьшению РНГР, а уменьшение – к росту. Данный показатель может быть использован для уменьшения напряженности графика работ за счет более равномерного их распределения по этапам. При изменении интервалов выполнения отдельных этапов разработки повышается эффективность разработки за счет более рационального распределения загрузки персонала в подразделениях организации. Возможно решение обратной задачи: по заданному риску ρ и выделенному времени $t_{\text{п}}$ определяются ресурсы для ускорения процесса проектирования. Для этого по формуле $t_p = -t_{\text{п}} / (\ln \rho + K_r)$ рассчитывается время проектирования компонента РТС, а затем находят дополнительные ресурсы для его уменьшения.

Заключение. Разработанное программно-информационное обеспечение и примеры расчетов показали возможности рассмотренных моделей и метода для управления проектом. Удалось за счет перераспределения ресурсов времени, изменения интенсивности ра-

бот на отдельных этапах, выбора компонентов с высоким уровнем готовности добиться уменьшения рисков в 2,5 раза при ограничении на время выполнения проекта РТС.

Преимуществом предложенного метода управления являются формализация процедур оценки рисков невыполнения работ, возможность оперативного контроля и оптимизации наиболее существенных показателей эффективности: риск нарушения графика работ, время проектирования, интенсивность выполнения работ на каждом участке. Управление не требует ненужной в данном случае детализации и значительно облегчает принятие решений на всех уровнях руководства проектом. Разработанное программно-информационное обеспечение дает возможность руководителю проекта в реальном масштабе времени получать объективные данные и выполнять мониторинг процесса создания РТС.

Литература

1. **Красковский И.** Обзор состояния рынка систем PLM/TDM/PDM/Workflow//САПР и графика. – 2004. – № 12. – URL: <https://sapr.ru/article/8330> (дата обращения 01.08.2018).
2. **Беспалов В., Клишин В., Краюшкин В.** Развитие систем PDM: вчера, сегодня, завтра... // САПР и графика. – 2002. – № 2. – URL: <https://sapr.ru/article/6860> (дата обращения 01.08.2018).
3. **Ширяев Н.** Тенденции развития PLM-технологий 2014 // САПР и графика. – 2013. – № 12. – URL: <https://sapr.ru/article/24304> (дата обращения 01.08.2018).
4. **Буренок В.М.** Проблемы создания системы управления полным жизненным циклом вооружений, военной и специальной техники // Вооружения и экономика. – 2014. – №2(27). – С. 4–9.
5. **Норенков И.П.** Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 360 с.
6. **Шубин Р.А.** Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с.
7. **Соложенцев Е.Д.** Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. – СПб.: Издат. дом «Бизнес-пресса», 2004. – 432 с.
8. **Боев С.Ф.** Метод создания высокоинформативных РЛС ВКО на базе событийной модели оценки рисков: науч.-метод. сб. ст. – Тверь: ЦНИИ Войск ВКО, 2014.
9. ГОСТ 2.103-68 ЕСКД. Стадии разработки. – М., 2002. – 3 с.
10. **Сыпчук П.П., Талалай А.М.** Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. – М.: Сов.радио, 1979. – 168 с.
11. **Федюкин В.К.** Управление качеством процессов. – СПб.: Питер, 2004. – 208 с.
12. **Иванов В.Г., Лосев В.В.** Методика автоматизации проектирования источника опорного напряжения, определяемого шириной запрещенной зоны кремния // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 1. – С. 64–70.
13. **Чебыкин А.Г., Меркутов А.С.** Маршрут автоматизированного проектирования устройств формирования и обработки сигналов для спутниковых навигационных систем // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 2. – С. 145–153.
14. **Ильин С.А.** Выбор базовых схмотехнических решений для проектирования библиотек цифровых ячеек // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 1. – С. 44–49.

Поступила 09.08.2018 г.; принята к публикации 25.09.2018 г.

Дембицкий Николай Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования, технологии и производства радиоэлектронных средств Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), dembitsky@mai.ru

Петраков Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникации» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), nio4@mai.ru

Шевцов Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникации Московского авиационного института (национально-го исследовательского университета) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), vs@mai.ru

References

1. Kraskovsky I. Market overview of PLM / TDM / PDM / Workflow systems. *CAD and graphics*, 2004, no. 12. Available at: <https://sapr.ru/article/8330> (accessed: 01.08.2018) (in Russian).
2. Bepalov V., Klishin V., Krayushkin V. Development of PDM systems: yesterday, today, tomorrow. *CAD and graphics*, 2002, no. 2. Available at: <https://sapr.ru/article/6860> (accessed: 01.08.2018) (in Russian).
3. Shiryaev N. Tendencies of development of PLM-technologies 2014. *CAD and graphics*, 2013, no. 12. Available at: <https://sapr.ru/article/24304> (accessed: 01.08.2018) (in Russian).
4. Burenok V.M. The problems of creating a management system for the full life cycle of armaments, military and special equipment. Armaments and economy. *Electronic journal*, 2014, no. 2, vol. 27. (in Russian).
5. Norenkov I.P. *Fundamentals of computer-aided design. Textbook for high schools*. Moscow, MSU Publishing House. N.E. Bauman, 2000. 360 p. (in Russian).
6. Shubin R.A. *Reliability of technical systems and technogenic risk: a textbook*. Tambov, Publishing house of FGBOU HPE «TSTU», 2012. 80 p. (in Russian).
7. Solozhentsev E.D. *Scenario logic-probabilistic risk management in business and technology*. St. Petersburg, Publishing house "Business-press", 2004. 432 p. (in Russian).
8. Boev S.F. *Method of creating highly informative radar on the basis of the event-based risk assessment model*. A scientific and methodological collection of articles of the Central Research Institute of the Armed Forces of the East Kazakhstan region, 2014. (in Russian).
9. *GOST 2.103-68 ESKD Stages of development*. Moscow, 2002. 3 p. (in Russian).
10. Sipchuk P.P., Talalay A.M. *Methods of statistical analysis in controlling the quality of manufacturing elements of REA*. Moscow, Sov. radio Publ., 1979. 168 p. (in Russian).
11. Fedyukin V.K. *Process quality management*. St. Petersburg, Piter Publ., 2004. 208 p. (in Russian).
12. Ivanov V.G., Losev V.V. The method of automation of the design of the reference voltage source, which is determined by the width of the forbidden band of silicon. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 64–70. (in Russian).
13. Chebykin A.G., Merkutov A.S. Route of automated design of signal conditioning devices for satellite navigation systems. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 2, pp. 145–153. (in Russian).
14. Ilyin S.A. Selection of basic circuit design solutions for the design of digital cell libraries. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 1, pp. 44–49. (in Russian).

Submitted 09.08.2018; Accepted 25.09.2018.

Information about the authors:

Nikolay L. Dembitsky – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Design, Technology and Production of Radioelectronic Facilities Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4), ndembitsky@gmail.com

Alexander M. Petrakov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Infocommunications Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4), nio4@mai.ru

Vyacheslav A. Shevtsov – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Infocommunications Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4), vs@mai.ru