

УДК 656.212:004.94

Функциональная модель системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде

В. А. Анисимов, О. С. Булакаева, С. В. Шкурников

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Анисимов В. А., Булакаева О. С., Шкурников С. В. Функциональная модель системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 117–130. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-117-130

Аннотация

Цель: Разработка новой технологии автоматизированного решения задач проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде. **Методы:** Применены методология структурного системного анализа, теория систем, принцип декомпозиции. **Результаты:** По результатам анализа структуры и функциональных возможностей широко используемых современных систем автоматизированного проектирования железных и автомобильных дорог определена последовательность процедур существующей технологии автоматизированного проектирования дорог. Предложена функциональная модель системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде на основе применения технологий информационного моделирования, интеллектуального анализа данных и математических методов оптимизации. **Практическая значимость:** Предлагаемая функциональная модель является основой для разработки системы автоматизированного проектирования, которая позволит реализовать новую технологию автоматизированного проектирования железных дорог, сократить трудозатраты и сроки разработки проектных решений, повысить их качество и эффективность.

Ключевые слова: Автоматизированное проектирование, железная дорога, информационное моделирование, информационная модель, информационно-цифровая среда, цифровая модель местности, структурный системный анализ, функциональное моделирование.

Введение

В данной работе под понятием «проектирование» будем рассматривать технологический процесс разработки проекта, результатом которого является инженерная модель объекта проектирования — проектное решение, удовлетворяющее требованиям технического задания (ТЗ). В ТЗ указывают цель и задачи проекта, основное назначение объекта проектирования, его технические характеристики, значимые технико-эксплуатационные и экономические показатели, условия реализации необходимых стадий проекта, в том числе использование технологий проектирования, а также специальные требования.

Цель проекта в своей основе определяется назначением объекта проектирования, т. е. функцией, которую он должен выполнять. Поэтому основной целью проектирования является создание инженерной модели объекта с требуемыми функциональными показателями эффективности, качества и надежности.

Цель проекта достигается посредством решения его задач. Процесс проектирования является итерационным. Проектировщик, выполняя элементарные проектные операции, получает промежуточные результаты, сравнивает их с требованиями к объекту проектирования, и если их отклонения от заданных требований выходят за допустимые техническими нормами пределы, то повторяет эти операции до получения удовлетворительных результатов.

Например, к элементарным проектным операциям в проектировании железных дорог относятся:

- определение положения вершины угла поворота плана трассы;
- выбор значений радиуса круговой и длин переходных кривых;
- определение положения точек начала и конца кривых, расчет длин прямых вставок между кривыми;
- определение положения точек перелома продольного профиля;
- назначение уклона и длины элемента профиля, расчет рабочих отметок и др.

После каждой операции проектировщик сравнивает полученные промежуточные результаты с техническими нормами, предъявляемыми к объекту проектирования.

Основная доля трудозатрат и времени проектирования приходится на повторяемые элементарные операции, оценку промежуточных результатов и чертежно-графические работы, например построение чертежей в ортографических и перспективных проекциях. Эти действия проектировщика являются рутинными. К ним относятся и сопутствующие основному процессу проектирования работы, такие как составление спецификаций и описаний, нормоконтроль чертежей, поиск аналогов и др.

При сложных условиях проектирования его трудоемкость существенно возрастает. С целью ее снижения, сокращения сроков и себестоимости проектирования,

а также повышения качества проектных решений повторяющиеся рутинные операции и расчеты автоматизируют. Для этого разрабатывают и используют системы автоматизированного проектирования (САПР, англ. CAD — Computer-Aided Design).

Основной целью САПР является повышение эффективности труда проектировщиков и качества проектных решений за счет совершенствования средств автоматизированного проектирования на основе комплексного подхода, технологичности, унификации и типизации, что позволяет существенно сократить трудовые затраты и сроки проектирования.

Задачи САПР:

- унификация, типизация и автоматизация проектных операций;
- автоматизация процесса принятия проектных решений;
- автоматизация оформления проектных решений, в том числе чертежно-графических работ и составления спецификаций и описаний;
- управление проектом и документооборотом;
- применение технологий параллельного проектирования;
- замена натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием;
- применение методов вариантного проектирования и оптимизации.

Проектирование железных дорог является сложным технологическим процессом, который основывается на комплексном решении задач проекта, учитывающем взаимодействие технических систем и их частей, как между собой, так и с внешней средой, а также социально-экономические и экологические последствия функционирования объекта проектирования.

Функциональные требования к проекту железной дороги заключаются в обеспечении ее надежной работы, минимальных строительных затрат и эксплуатационных расходов, максимальных доходов, безопасности транспортных процессов и безвредности ее функционирования для окружающей среды.

Разработка проектов сложных технических объектов, к которым относятся железные дороги, должна основываться на системном подходе и применении автоматизированного проектирования.

Структурный и функциональный анализ современных систем автоматизированного проектирования (САПР), широко используемых для проектирования железных и автомобильных дорог (Credo, Robur, САПР КРП, Card/1, GeoniCS, IndorCAD/Road, Bentley Rail Track, Autodesk Rail Layout Module, Trimble Quantm), проведенный в [1–11], и обобщение результатов данного анализа позволили определить следующую последовательность процедур существующей технологии автоматизированного проектирования железных дорог:

- 1) создание цифровой модели местности (ЦММ) по данным инженерных изысканий, построение и анализ поверхностей;

- 2) проектирование плана трассы;
- 4) проектирование продольного профиля трассы;
- 5) проектирование поперечных профилей земляного полотна;
- 6) размещение искусственных сооружений;
- 7) трехмерная визуализация местности и проектируемой дороги с постоянными устройствами и сооружениями;
- 8) визуальная оценка проектного положения постоянных устройств и сооружений на 3D-видах местности и дороги;
- 9) корректировка проектного положения трассы (пп. 2–5);
- 10) формирование и печать проектной документации.

Как видим, в существующей технологии реализовано проектирование дороги в проекциях (пп. 2–5), на основе которых создаются 3D-виды местности и проектируемой дороги для визуальной оценки проектного решения.

Применение в проектировании объектов капитального строительства технологии информационного моделирования, интеллектуального анализа данных и математических методов оптимизации требует коренного пересмотра существующей технологии автоматизированного проектирования железных дорог.

В данной статье рассмотрен первый уровень функциональной модели САПР железных дорог (САПР ЖД), которая предлагается авторами для реализации новой технологии автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде.

Материалы и методы

Разработка САПР ЖД является сложной и комплексной задачей, решение которой начинают с построения концептуальной модели системы. На первом этапе выполняют исследование и анализ информационных, функциональных, технических и технологических требований и возможностей. Вторым этапом на основе результатов анализа проектируют функциональную модель системы, используя средства функционального моделирования, которые позволяют описать выполняемые процессы и связывающие их информационные потоки.

Функционально автоматизированное проектирование железной дороги можно представить как совокупность взаимосвязанных процессов информационного преобразования входных потоков данных в выходные. Для описания таких процессов широко используются методологии структурного анализа, которые основываются на принципах декомпозиции, абстрагирования, иерархической структуризации, формализации и непротиворечивости.

С помощью декомпозиции каждый процесс в функциональной модели САПР ЖД разбивается на подпроцессы по уровням абстрагирования, в пределах которых используют только существенные для данного уровня компоненты и элементы

системы. Таким образом, на основе принципа иерархической структуризации выполняется последовательная детализация процессов от первого уровня к последующим.

На каждом уровне декомпозиции процесса число подпроцессов ограничивается от 3 до 8, что определяется целостным восприятием совокупности компонентов и элементов системы, связанных информационными потоками. Каждый процесс в модели должен иметь входные потоки данных и формируемые в нем выходные потоки, необходимые для последовательного достижения конечной цели автоматизированного проектирования железной дороги.

Для обеспечения требований полноты и непротиворечивости при декомпозиции функциональной модели необходимо применять строгие правила формализации компонентов системы, которые позволяют контролировать согласованность ее элементов с помощью их информационных связей.

Для формализованного описания функциональной модели САПР ЖД применим Data Flow Diagrams — диаграммы потоков данных DFD в нотации Йодана (Yourdon) [5, 12]. К элементам DFD относятся логические функции (процессы), хранилища данных (накопители информации), внешние сущности и потоки данных, посредством которых моделируют передачу информации между процессами, хранилищами данных и внешними сущностями.

Логической функции дается имя в соответствии с сущностью процесса обработки входных потоков данных и формирования выходных, а также присваивается уникальный номер для ссылок на нее внутри диаграммы.

Хранилищу данных присваивают имя, которое должно соответствовать находящейся в нем информации.

Потоками данных моделируют передачу информации между логическими функциями, хранилищами данных и внешними сущностями. Их обозначают именованными стрелками, при этом имя потока, входящего в хранилище данных или выходящего из него и соответствующего по своей структуре хранилищу, на диаграмме обычно не отображают.

Внешние сущности являются источниками и (или) приемниками потоков данных и рассматриваются как внешние объекты или субъекты по отношению к процессу.

При декомпозиции функциональной модели детализация процессов на каждом последующем иерархическом уровне абстрагирования выполняется с использованием DFD или миниспецификации, которая описывает логику функции на последнем уровне иерархической структуризации модели.

DFD нижнего уровня на входе и выходе должна иметь только те внешние сущности и хранилища данных, с которыми детализируемая функция связана с помощью информационных потоков на родительской диаграмме.

При детализации логических функций применяется правило иерархической нумерации, т. е., детализируя процесс DFD с номером 3, функции нижнего уровня обозначают номерами 3.1, 3.2, 3.3 и т. д.

Результаты

На этапе анализа авторами были исследованы информационные, функциональные, технические и технологические требования к САПР ЖД, а также технические и технологические возможности современных аппаратно-программных средств и перспективы их развития. Полученные результаты анализа были использованы в разработке концепции автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде на основе применения технологии информационного моделирования и математических методов оптимизации.

Концепция представлена функциональной иерархической моделью системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде, которая включает в себя:

- контекстную диаграмму с основным процессом (см. рис. 1), определяющим главную цель системы — создание цифрового проекта железной дороги;
- диаграммы DFD, с помощью которых выполнена декомпозиция основного процесса «Проектирование железной дороги».

Компоненты диаграмм DFD:

- функции — процессы обработки входных и формирования выходных информационных потоков, необходимых для формирования и актуализации информационно-цифровой среды и создания цифрового проекта железной дороги;
- хранилища данных: СТН — строительно-технические нормы; ИЦММ — информационная цифровая модель местности; ЦИМ ЖД — цифровая информационная модель железной дороги; БКТР — библиотека конструктивно-технических решений по устройствам, сооружениям и техническому оснащению объекта строительства; ВПР ТЭП — варианты проектных решений с технико-экономическими показателями;
- внешние сущности — объекты или субъекты вне контекста основного процесса, используемые для формирования и актуализации информационно-цифровой среды для проектирования железной дороги;
- входные и выходные информационные потоки между процессами, хранилищами данных и внешними сущностями.

В СП 328.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели» введен термин «библиотека компонентов информационной модели» и дано определение компонента информационной модели (КИМ) — «цифровое представление части объекта капитального строительства или территории, характеризующее атрибутивными и геометрическими данными, предназначенное для многократного использования».

Библиотека КИМ представляет собой структурированное хранилище компонентов, которые используют для построения информационной модели объекта строительства как совокупности трехмерных элементов, взаимосвязанных по атрибутивным, геометрическим и пространственным параметрам.



Рис. 1. Контекстная диаграмма САПР ЖД

В предлагаемой САПР ЖД библиотекой КИМ является библиотека конструктивно-технических решений. Она применяется для разработки вариантов проектных решений ВПР ТЭП, из которых в результате формируют ЦИМ ЖД.

На контекстной диаграмме (рис. 1) показано информационное взаимодействие основного процесса «Проектирование железной дороги» с внешними сущностями «Заказчик» и «Проектировщик» через информационно-цифровую среду (ИЦС).

ИЦС формируется на основе данных технического задания на проектирование, законодательных актов, системы нормативной документации (СНД), социально-экономических требований, данных о топографических, инженерно-геологических, мерзлотных, гидрографических, сейсмических и климатических условиях, природоохранных требований, конструктивно-технических решений по устройствам, сооружениям и техническому оснащению железной дороги.

Основой информационно-цифровой среды является ИЦММ, которая формируется по данным инженерных изысканий.

ИЦС для проектирования железной дороги включает в себя также:

- строительно-технические нормы;

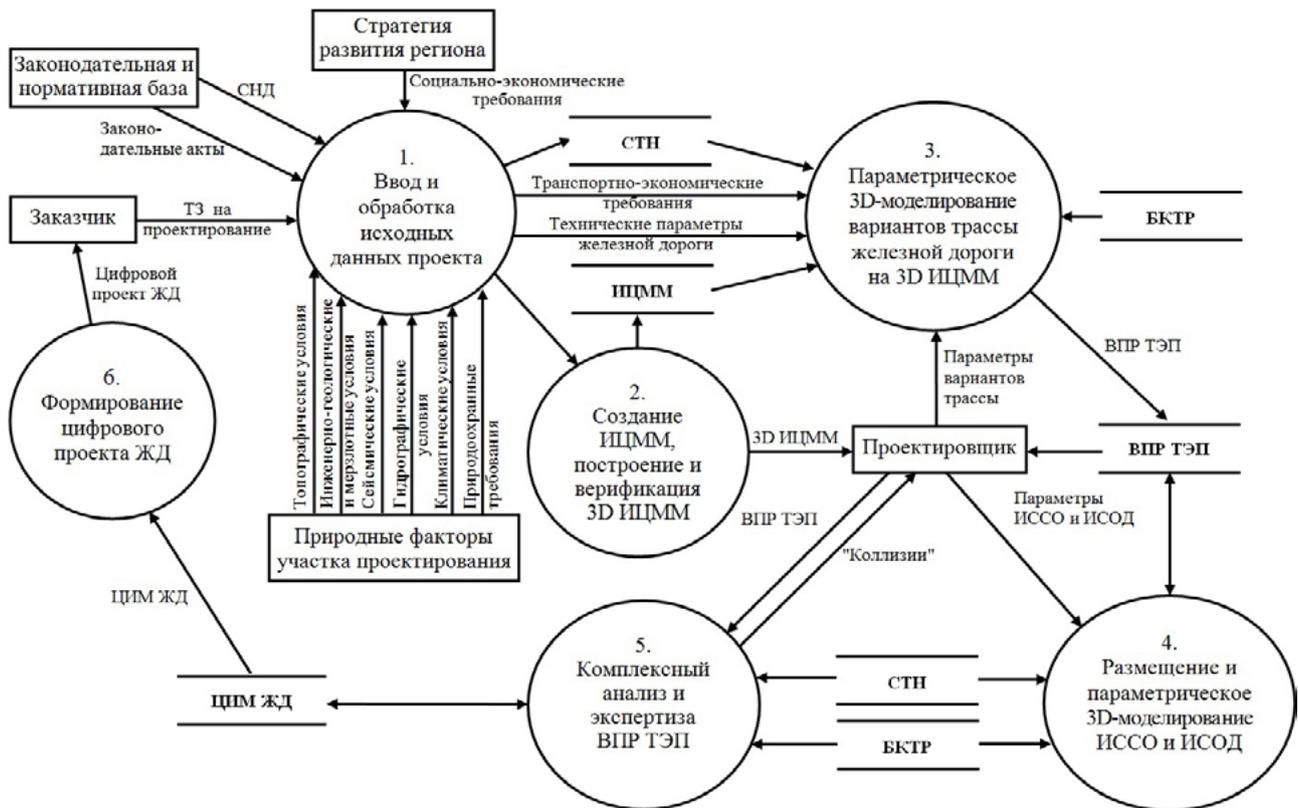


Рис. 2. Первый уровень структурной декомпозиции контекстного процесса «Проектирование железной дороги»

- библиотеку конструктивно-технических решений по устройствам, сооружениям и техническому оснащению объекта строительства;
- технические, технологические, социально-экономические и природоохранные требования;
- варианты проектных решений с технико-экономическими показателями для их сравнения;
- цифровую информационную модель железной дороги (ЦИМ ЖД).

Используя ИЦС, «Проектировщик» с учетом природных условий участка проектирования, транспортно-экономических, технических и нормативных требований разрабатывает варианты проектных решений, по которым рассчитываются технико-экономические показатели [13], необходимые для принятия эффективных решений. Из принятых проектных решений «Проектировщик» формирует окончательный вариант ЦИМ ЖД, которая передается «Заказчику» с разработанным цифровым проектом железной дороги.

Следующим этапом построения функциональной модели САПР ЖД является декомпозиция контекстного процесса «Проектирование железной дороги». Используя принципы абстрагирования и иерархической структуризации, функциональную модель системы разбивают на уровни абстракции. На первом уровне (рис. 2) представлены процессы, определяющие основные этапы новой технологии автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде:

- 1) ввод и обработка исходных данных проекта;
- 2) создание ИЦММ по данным инженерных изысканий, построение и верификация визуальной трехмерной модели местности (3D ИЦММ);
- 3) проектирование трассы железной дороги на 3D ИЦММ с применением параметрического 3D-моделирования;
- 4) размещение и параметрическое 3D-моделирование искусственных сооружений (ИССО) и инженерно-сервисного обустройства дороги (ИСОД);
- 5) комплексный анализ и экспертиза ВПР ТЭП для выявления проектных ошибок («коллизий»);
- 6) устранение «коллизий» (корректировка проектных решений и ЦИМ ЖД — пп. 3–5);
- 7) генерация чертежей в ортографических и перспективных проекциях, спецификаций и другой проектной документации.

Процессы последующих уровней функциональной модели САПР ЖД рассмотрим в цикле статей, посвященных реализации предложенной авторами концепции автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде.

Заключение

Предлагаемая функциональная модель САПР ЖД является базовой основой для технологической модернизации автоматизированного проектирования железных дорог на основе применения следующих инноваций:

- технологий информационного моделирования [7, 14];
- интеллектуального анализа данных;
- математических методов оптимизации [15–25].

Новая технология автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде позволит решать следующие задачи:

- концептуальное 3D-проектирование железной дороги в увязке с местными условиями участка проектирования;
- технико-экономическое обоснование проектных решений;
- детальное проектирование объектов железнодорожной инфраструктуры на основе использования параметрического 3D-моделирования;
- оптимизация проектных решений на основе интеллектуального анализа данных, математических методов оптимизации, а также трехмерной визуализации и симуляции;
- управление совместной работой участников проекта на всех этапах его жизненного цикла;
- анализ проектных решений для выявления возможных ошибок на ранних стадиях проектирования.

В Петербургском государственном университете путей сообщения в рамках стратегического проекта № 3 «Развитие объектов транспортной инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации» программы развития «Приоритет-2030» проводится научно-исследовательская работа для разработки и реализации технологии автоматизированного проектирования железных дорог в соответствии с предлагаемой авторами концепцией.

Библиографический список

1. Бучкин В. А. Базовый функционал САПР железных дорог / В. А. Бучкин, Е. П. Ленченкова, Е. А. Рыжик // Транспорт Урала. — 2013. — № 2(37). — С. 59–63.
2. Бучкин В. А. Сравнительный анализ программных комплексов / В. А. Бучкин, Е. А. Рыжик, Е. П. Ленченкова // Мир транспорта. — 2013. — № 11(2). — С. 112–121.
3. Струченков В. И. Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений / В. И. Струченков. — М.: СолонПресс, 2014. — 272 с.
4. Струченков В. И. Компьютерные технологии в проектировании трасс линейных сооружений / В. И. Струченков // Российский технологический журнал. — 2017. — Т. 5. — № 1(15). — С. 29–41.
5. Anisimov V. The Functional Models of System of the Automated Design of the Railroads on the Basis of Use of Three-dimensional Terrain Models / V. Anisimov, K. Malykh, A. Anisimov et al. // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 165. — Pp. 1873–1879. — DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.936.
6. Пеньков А. А. Программный комплекс Bentley / А. А. Пеньков // CADmaster. — 2009. — № 4(49). — С. 56–58.
7. Мохсизадех Г. Программные разработки Bentley обеспечивают реализацию проекта первой в Дании высокоскоростной железной дороги / Г. Мохсизадех // CADmaster. — 2018. — № 2(88). — С. 51–53.
8. Пархолуп С. Система проектирования транспортных магистралей Trimble Quantm / С. Пархолуп // CADmaster. — 2013. — № 1(68). — С. 76–77.
9. CARD/1. — URL: http://card-1.ru/produkty/zhd_pryektirovanye/ (дата обращения: 15.10.2022).
10. Топоматик Robur — Железные дороги. — URL: <https://new.topomatic.ru/products/rail/> (дата обращения: 15.11.2022).
11. Применение комплекса КРЕДО в дорожно-транспортном строительстве. — URL: <https://credo-dialogue.ru/tekhnologii/transport.html/> (дата обращения: 18.11.2022).
12. Анисимов Вл. А. Принципы создания информационной системы проектирования изменения облика и мощности региональной сети железных дорог / Вл. А. Анисимов // Информационные технологии. — М.: Новые технологии, 2004. — № 11. — С. 36–42.
13. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. — Вторая редакция, исправленная и дополненная. — Утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. № ВК 477.

14. Biancardo S. A. Procedural Modeling-Based BIM Approach for Railway Design / S. A. Biancardo, M. Intignano, N. Viscione et al. // *Journal of Advanced Transportation*. — 2021. — 17 p. — URL: <https://doi.org/10.1155/2021/8839362>.

15. Полосин Ю. К. Методы оптимального проектирования трассы железных дорог / Ю. К. Полосин. — Л., 1965. — 171 с.

16. Понарин А. С. Математические модели в трассировании железных дорог: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. С. Понарин. — М., 1995. — 48 с.

17. Анисимов В. А. Трассирование на участках напряженных ходов с применением математических методов / В. А. Анисимов // *Труды МИИТ*. — 1980. — Вып. 668. — С. 135–157.

18. Анисимов В. А. Численные методы выбора положения трассы на участке напряженного хода / В. А. Анисимов // *Труды МИИТ*. — 1982. — Вып. 715. — С. 98–107.

19. Джонс Дж. К. Методы проектирования / Дж. К. Джонс. — М.: Мир, 1986. — 326 с.

20. Струченков В. И. Основы теории и методы оптимизации трасс железных дорог и других линейных объектов: дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Струченков. — М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1985. — 405 с.

21. Струченков В. И. Математические рекомендации по совершенствованию математического обеспечения автоматизированного проектирования плана и профиля трассы новых железных дорог и вторых путей. — М.: ВНИИТС, 1985. — 117 с.

22. Струченков В. И. Методы оптимизации. Основы теории, задачи, обучающие компьютерные программы: учебное пособие / В. И. Струченков. — М.: Экзамен, 2005. — 256 с.

23. Struchenkov V. I. Nonlinear Programming Algorithm for CAD Systems of Line Structure Routing / V. I. Struchenkov // *World Journal of Computer Application & Technology*. — 2014. — Vol. 2(5). — Pp.114–120. — DOI: 10.13189/wjcat.2014.020503.

24. Struchenkov V. I. Models and methods of nonlinear programming in the CAD system of railways routing / V. I. Struchenkov // *Recent Patents on Computer Science*. — 2015. — Vol. 8(2). — Pp. 159–166. — DOI: 10.2174/2213275908666150309232307.

25. Струченков В. И. О методологии компьютерного проектирования трасс линейных сооружений / В. И. Струченков // *САПР и графика*. — 2013. — № 7(201). — Pp. 26–30.

Дата поступления: 21.10.2022

Решение о публикации: 21.11.2022

Контактная информация:

АНИСИМОВ Владимир Александрович — д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; anisvl@mail.ru

БУЛАКАЕВА Ольга Сергеевна — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; olya.morozova51@gmail.com

ШКУРНИКОВ Сергей Васильевич — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Изыскания и проектирование железных дорог»; 3123810@mail.ru

Functional Model of Railway Automated Design System in Informational-Digital Environment

V. A. Anisimov, O. S. Bulakaeva, S. V. Shkurnikov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Anisimov V. A., Bulakaeva O. S., Shkurnikov S. V. Functional Model of Railway Automated Design System in Informational-Digital Environment. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 4, pp. 117–130. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-117-130

Summary

Purpose: Development of new technology for automated solution for railway design tasks in informational-digital environment. **Methods:** Structural system analysis methodology, system theory, the principle of decomposition are applied. **Results:** Based on analysis results for structure and functional possibilities of widely used modern systems of railway and highway automated design, the procedures sequence for existing technology of railway automated design was defined. Functional model of railway automated design system in informational-digital environment, based on the application of informational modeling technologies, data mining and mathematical optimization methods, is proposed. **Practical importance:** The proposed functional model represents the basis for the development of automated design system that will allow implementing new technology for railway automated design, reducing labor costs and time for the development of design solutions, improving their quality and efficiency.

Keywords: Automated computer design, railway, informational modeling, informational model, informational-digital environment, terrain digital model, structural system analysis, functional modeling.

References

1. Buchkin V. A., Lenchenkova E. P., Ryzhik E. A. Bazovyy funktsional SAPR zheleznnykh dorog [Basic functionality of railway CAD]. *Transport Urala* [Ural transport]. 2013, I. 2(37), pp. 59–63. (In Russian)
2. Buchkin V. A., Ryzhik E. A., Lenchenkova E. P. Sravnitel'nyy analiz programmnykh kompleksov [Comparative analysis of software systems]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2013, I. 11(2), pp. 112–121. (In Russian)
3. Struchenkov V. I. Metody optimizatsii trass v SAPR lineynykh sooruzheniy [Methods for optimizing routes in CAD for linear structures]. Moscow: SolonPress Publ., 2014, 272 p. (In Russian)
4. Struchenkov V. I. Komp'yuternye tekhnologii v proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy [Computer technologies in designing the routes of linear structures]. *Rossiyskij tekhnologicheskij zhurnal* [Russian technological journal]. 2017, vol. 5, I. 1(15), pp. 29–41. (In Russian)
5. Anisimov V., Malykh K., Anisimov A. The Functional Models of System of the Automated Design of the Railroads on the Basis of Use of Three-dimensional Terrain Models. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 165, pp. 1873–1879. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.936.

6. Pen'kov A. A. Programmnyy kompleks Bentley [Software complex Bentley]. *CADmaster*. 2009, I. 4(49), pp. 56–58. (In Russian)
7. Mokhsizadekh G. Programmnye razrabotki Bentley obespechivayut realizatsiyu proekta pervoy v Danii vysokoskorostnoy zheleznoy dorogi [Bentley software developments enable Denmark's first high-speed rail project]. *CADmaster*. 2018, I. 2(88), pp. 51–53. (In Russian)
8. Parkholup S. Sistema proektirovaniya transportnykh magistraley Trimble Quantm [Trimble Quantm Highway Design System]. *CADmaster*. 2013, I. 1(68), pp. 76–77. (In Russian)
9. CARD/1. Available at: http://card-1.ru/produkty/zhd_pryektirovanye/ (accessed: October 15, 2022). (In Russian)
10. *Topomatik Robur — Zhelezny`e dorogi* [Topomatic Robur — Railways]. Available at: <https://new.topomatic.ru/products/rail/> (accessed: November 15, 2022). (In Russian)
11. *Primenenie kompleksa KREDO v dorozhno-transportnom stroitel`stve* [Application of the CREDO complex in road construction]. Available at: <https://credo-dialogue.ru/tekhnologii/transport.html/> (accessed: November 18, 2022). (In Russian)
12. Anisimov V. I. Printsipy sozdaniya informatsionnoy sistemy proektirovaniya izmeneniya oblika i moshchnosti regional'noy seti zheleznykh dorog [Principles of creating an information system for designing changes in the appearance and capacity of the regional railway network]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology]. Moscow: Novye tekhnologii Publ., 2004, I. 11, pp. 36–42. (In Russian)
13. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov. — Vtoraya redaktsiya, ispravlennaya i dopolnennaya. Utv. Minekonomiki RF, Minfinom RF i Gosstroem RF ot 21 iyunya 1999 g. № VK 477* [Guidelines for evaluating the effectiveness of investment projects. Second edition, corrected and supplemented. Approved. Ministry of Economy of the Russian Federation, Ministry of Finance of the Russian Federation and Gosstroy of the Russian Federation dated June 21, 1999 № VK 477]. (In Russian)
14. Biancardo S. A., Intignano M., Viscione N. Procedural Modeling-Based BIM Approach for Railway Design. *Journal of Advanced Transportation*. 2021, 17 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/8839362>.
15. Polosin Yu. K. *Metody optimal'nogo proektirovaniya trassy zheleznykh dorog* [Methods of optimal design of the route of railways]. L., 1965, 171 p. (In Russian)
16. Ponarin A. S. *Matematicheskie modeli v trassirovanii zheleznykh dorog: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Mathematical models in tracing railways: author. dis. ... Dr. tech. Sciences]. Moscow, 1995, 48 p. (In Russian)
17. Anisimov V. A. Trassirovanie na uchastkakh napryazhennykh khodov s primeneniem matematicheskikh metodov [Tracing on sections of stressed passages using mathematical methods]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1980, I. 668, pp. 135–157. (In Russian)
18. Anisimov V. A. Chislennyye metody vybora polozheniya trassy na uchastke napryazhennogo khoda [Numerical methods for choosing the position of the route on the section of the stressed path]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1982, I. 715, pp. 98–107. (In Russian)

19. Dzhons Dzh. K. *Metody proektirovaniya* [Design methods]. Moscow: Mir Publ., 1986, 326 p. (In Russian)
20. Struchenkov V. I. *Osnovy teorii i metody optimizatsii trass zheleznykh dorog i drugikh lineynykh ob'ektov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Fundamentals of the theory and optimization methods for railway tracks and other linear objects: dis. ... Dr. tech. Sciences]. Moscow: VNII transp. str-va Publ., 1985, 405 p. (In Russian)
21. Struchenkov V. I. *Matematicheskie rekomendatsii po sovershenstvovaniyu matematicheskogo obespecheniya avtomatizirovannogo proektirovaniya plana i profilya trassy novykh zheleznykh dorog i vtorykh putey* [Mathematical recommendations for improving the software for automated design of the plan and profile of the route of new railways and second tracks]. Moscow: VNIITS Publ., 1985. 117 p. (In Russian)
22. Struchenkov V. I. *Metody optimizatsii. Osnovy teorii, zadachi, obuchayushchie komp'yuternye programmy: uchebnoe posobie* [Optimization methods. Fundamentals of the theory, tasks, teaching computer programs: textbook]. Moscow: Ekzamen Publ., 2005, 256 p. (In Russian)
23. Struchenkov V. I. Nonlinear Programming Algorithm for CAD Systems of Line Structure Routing. *World Journal of Computer Application & Technology*. 2014, vol. 2(5), pp.114–120. DOI: 10.13189/wjcat.2014.020503.
24. Struchenkov V. I. Models and methods of nonlinear programming in the CAD system of railways routing. *Recent Patents on Computer Science*. 2015, vol. 8(2), pp. 159–166. DOI: 10.2174/2213275908666150309232307.
25. Struchenkov V. I. *O metodologii komp'yuternogo proektirovaniya trass lineynykh sooruzheniy* [On the methodology of computer-aided design of the routes of linear structures]. *SAPR i grafika* [CAD and graphics]. 2013, I. 7(201), pp. 26–30. (In Russian)

Received: October 21, 2022

Accepted: November 21, 2022

Author's information:

Vladimir A. ANISIMOV — D. Sci. in Engineering, Assistant Professor, Railway Research and Projection Department, Professor; anisvl@mail.ru

Olga S. BULAKAEVA — PhD in Engineering, Railway Research and Projection Department, Assistant; olya.morozova51@gmail.com

Sergey V. SHKURNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Research and Projection Department, Head; 3123810@mail.ru