УДК 658.5

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА В ЦИКЛ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

© 2026 Д.В. Антипов[1], И.С. Васин[2]

[1] Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, г. Самара , Россия
[2] ООО «ГРУППА КОМПАНИЙ УЛЬТРА», г. Самара , Россия

Статья поступила в редакцию 11.06.2026

В статье предложена математическая модель количественной оценки эффективности интеграции реверс-инжиниринга в процесс опытно-конструкторской работы средств измерения и контроля. Разработана система показателей эффективности, характерных для средств измерения и контроля, которые в совокупности с весовыми коэффициентами позволяют посчитать интегральный индекс совершенствования процесса $I_{окр}$. Показатели эффективности приводятся к безразмерной шкале от 0 до 1 методом минимаксного нормирования, весовые коэффициенты определяются методом анализа иерархий Саати. Разработан алгоритм оценки, который включает анализ несоответствий и итерационную корректировку. Проверка математической модели выполнена на примере процесса опытно-конструкторской работы по проектированию электромагнитного расходомера. Математическая модель универсальна, допускает настройку под отраслевые особенности и может применяться для обоснования управленческих решений на предприятиях машиностроения и приборостроения.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, опытно-конструкторская работа, эффективность, интегральный индекс, частные показатели, многовариантные изделия, средства измерения и контроля, математическая модель .

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-141-146
EDN: RSJOST

ВВЕДЕНИЕ

Современные средства измерения и контроля (СИК) характеризуются высокой степенью многовариантности исполнений, различающихся типоразмерами, материалами чувствительных элементов, видами взрывозащиты, типами присоединений, метрологическими характеристиками и другими параметрами [1, 2]. Проектирование таких изделий в рамках традиционной опытно-конструкторской работы (ОКР) сопряжено со значительными временными и финансовыми затратами, а ручное управление конфигурациями многократно увеличивает риски ошибок и несоответствий.

Интеграция реверс-инжиниринга (РИ) в цикл ОКР рассматривается как перспективный инструмент оптимизации, упрощения и ускорения процесса разработки многовариантных изделий [3, 4]. Анализ существующего образца-аналога позволяет на ранних стадиях выявить удачные конструктивные решения, определить критические параметры, подлежащие изменению, и исключить дублирование при проектировании. Это особенно важно для многовариантных СИК, где каждое изменение в базовой конструкции должно быть корректно транслировано на последующие зависимые исполнения изделия.

Однако на практике отсутствует научно обоснованный инструмент, позволяющий количественно оценить достигаемый эффект от интеграции РИ и сопоставить его с затратами на внедрение. Существующие подходы к оценке эффективности ОКР, как правило, ограничиваются отдельными показателями (сроки, бюджет) и не учитывают многогранную специфику обратного проектирования [5, 6].

Научная проблема заключается в необходимости разработки многокритериальной математической модели, которая охватывала бы технические, временные, экономические и организационные аспекты интеграции РИ, обеспечивала бы свертку разнородных показателей в единый количественный критерий и позволяла бы выявлять недостатки процесса для его целенаправленного улучшения. Математическая должна быть одинаково применима как для оценки эффективности интеграции РИ в ОКР многовариантных СИК, так и для других изделий машиностроения и приборостроения.

Антипов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: antipov.dv@ssau.ru
Васин Илья Сергеевич, руководитель конструкторского отдела. E-mail: sevaergurk@yandex.ru

Цель настоящей статьи — представить разработанную математическую модель оценки эффективности интеграции РИ в ОКР, включая систему частных показателей, интегральный индекс $I_{окр}$ и алгоритм его расчета.

СИСТЕМА ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

На основе анализа проблем традиционного ОКР [7] и требований к модели интеграции РИ [8] сформирована система из шести показателей.

Коэффициент вариантивности:

$$К_{В} = \frac{N_{В1}}{N_{В2}}, \quad (1)$$

где $N_{В1}$ – количество реализованных в новом изделии вариантов исполнения, шт., $N_{В2}$ – количество вариантов исполнения согласно техническому заданию, шт.

Коэффициент объема изменений:

$$К_{И} = \frac{N_{И1}}{N_{И2}}, \quad (2)$$

где $N_{И1}$ – количество измененных характеристик изделия относительно базового образца, шт., $N_{план}$ – количество характеристик изделия, которое планировалось изменить согласно техническому заданию, шт.

Коэффициент новизны:

$$К_{Н} = \frac{1}{N_{нов}} \sum_{j=1}^{N_{нов}} r_j, \quad (3)$$

где $N_{нов}$ – количество запланированных новых решений, шт., r_j – экспертная оценка j- нового технического решения (безразмерная величина от 0 до 1).

Коэффициент сроков опытно-конструкторской работы:

$$К_{С} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (4)$$

где T_1 – типовая длительность опытно-конструкторской работы, мес., T_2 – длительность опытно-конструкторской работы при применении реверс-инжиниринга, мес.

Коэффициент экономической эффективности:

$$К_{Э} = \frac{C_1 - C_2}{C_1}, \quad (5)$$

где C_2 – типовая себестоимость опытно-конструкторской работы, руб., C_2 – себестоимость опытно-конструкторской работы при применении реверс-инжиниринга, руб.

Коэффициент метрологического соответствия:

$$К_{М} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1}, \quad (6)$$

где δ_1 – основная относительная погрешность образца-аналога, %, C_2 – основная относительная погрешность нового изделия, %.

НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНДЕКСА

Все показатели приводятся к безразмерной шкале [0; 1] методом минимаксного нормирования [9]. Для всех шести показателей, рост которых свидетельствует о повышении эффективности, используется единая формула:

$$P_i^{н} = \frac{P_i - P_i^{мин}}{P_i^{макс} - P_i^{мин}}, \quad (7)$$

где P_i – фактическое значение i-го показателя; $P_i^{мин}$, $P_i^{макс}$ – минимальное и максимальное значения, определенные на основе статистических или нормативных плановых данных процесс опытно-конструкторской работы.

Определение высовых коэффициентов экспертным путем (группой специалистов предприятия, где проводилось опровование методики) по методу анализа иерархий Саати с проверкой согласованности матрицы парных сравнений (отношение согласованности ⩽ 0,10). В итоге получились рекомендованные типовые значения для изделий машиностроения и приборостроения: $\alpha_{в} = 0{,}20$; $\alpha_{и} = 0{,}15$; $\alpha_{н} = 0{,}15$; $\alpha_{с} = 0{,}20$; $\alpha_{э} = 0{,}20$; $\alpha_{м} = 0{,}10$.

Интегральный индекс совершенствования процесса ОКР вычисляется как аддитивная свертка нормированных показателей с весовыми коэффициентами:

$$I_{окр} = \alpha_{к} \cdot К_{к}^{н} + \alpha_{а} \cdot К_{а}^{н} + \alpha_{м} \cdot К_{м}^{н} + \alpha_{п} \cdot К_{п}^{н} + \alpha_{э} \cdot К_{э}^{н} + \alpha_{с} \cdot К_{с}^{н}, \quad (8)$$

где α_i – весовые коэффициенты, $\sum a_i = 1$.

Для интерпретации $I_{окр}$ предложена пятиуровневая шкала (табл. 1).

Таблица 1. Шкала интерпретации интегрального индекса $I_{окр}$

Значение $I_{окр}$	Интерпретация значения	Примечание
0,85 – 1,00	Высокий	Интеграция дала существенное улучшение, все цели достигнуты
0,70 – 0,85	Выше среднего	Интеграция эффективна, имеются резервы для улучшения
0,50 – 0,70	Средний	Требуется оптимизация отдельных процедур и показателей
0,30 – 0,50	Ниже среднего	Необходима корректировка модели интеграции
0,00 – 0,30	Низкий	Интеграция неэффективна, требуется пересмотр стратегии

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Разработан формализованный алгоритм, интегрирующий расчетные формулы непосредственно в последовательность шагов (рис. 1).

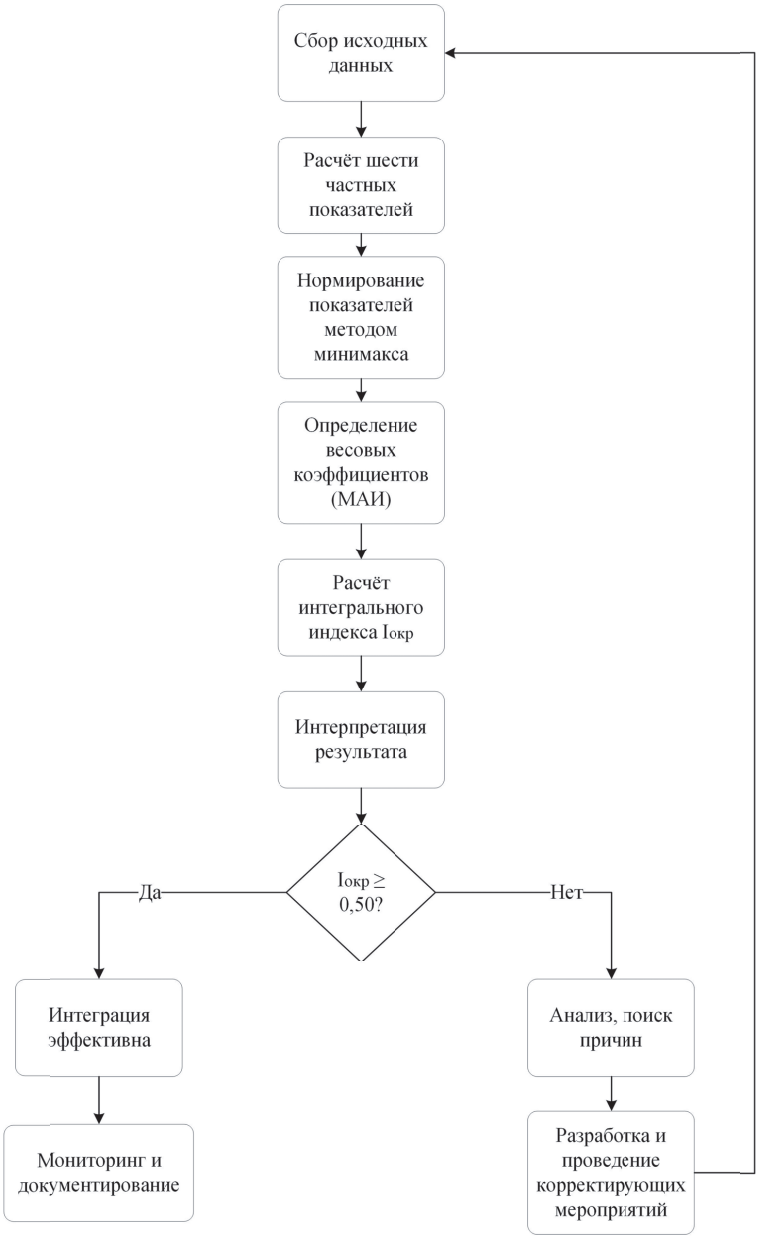

Рис. 1. Блок-схема алгоритма оценки эффективности интеграци реверс-инжиниринга в опытно-конструкторсккую работу

Алгоритм включает шесть основных шагов:

– сбор исходных данных (фактические значения для проекта с РИ и базовые значения для типового проекта без РИ);

– расчет шести частных показателей по формулам (1)–(6);

– нормирование показателей методом минимакса;

– определение весовых коэффициентов (МАИ);

– расчет интегрального индекса $I_{окр}$;

– интерпретация результата по шкале табл. 1.

Если $I_{окр} \leqslant 0{,}50$, выполняется анализ недостатков процесса – выявляются показатели с наименьшими нормированными значениями, разрабатываются и внедряются корректирующие мероприятия, после чего производится повторный сбор данных и пересчет индекса. Итерационный цикл повторяется до достижения приемлемого уровня эффективности.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Для демонстрации работоспособности методики использованы данные, полученные при имитационном моделировании интеграции РИ в ОКР электромагнитного расходомера – многовариантного СИК, включающего исполнения по типоразмеру (DN200…DN1600), материалам футеровки (эмаль, фторопласт, полиуретан, керамика), типам присоединений и виду взрывозащиты [1, 2]. Исходные данные сформированы путем сопоставления показателей усовершенствованного процесса ОКР, с типовыми показателями проектов-аналогов, выполненных по традиционной схеме.

Граничные значения $P_i^{мин}$, $P_i^{макс}$ определены экспертно на основе статистики традиционных ОКР и целевых ориентиров модели (табл. 2).

Таблица 2. Исходные данные для расчета $I_{окр}$

Показатель	Фактическое значение (проект с РИ)	Базовое значение (типовой ОКР)	$P_i^{мин}$	$P_i^{макс}$
$К_В$	0,70	0,40	0,00	1,00
$К_И$	0,80	0,50	0,00	1,00
$К_Н$	0,70	0,30	0,00	1,00
$К_С$	0,27	0,00	–0,10	0,50
$К_Э$	0,20	0,00	–0,05	0,40
$ОК_М$	0,20	0,00	–0,5	0,50

Расчет нормированных значений по формуле (7):

$$К_В^Н = \frac{0{,}80-0}{1-0} = 0{,}70,$$

$$К_И^Н = \frac{0{,}80-0}{1-0} = 0{,}80,$$

$$К_Н^Н = \frac{0{,}70-0}{1-0} = 0{,}70,$$

$$К_С^Н = \frac{0{,}27-(-0{,}10)}{0{,}50-(-0{,}10)} = \frac{0{,}37}{0{,}60} \approx 0{,}617,$$

$$К_Э^Н = \frac{0{,}20-(-0{,}05)}{0{,}40-(-0{,}050)} = \frac{0{,}25}{0{,}45} \approx 0{,}556,$$

$$К_М^Н = \frac{0{,}20-(-0{,}50)}{0{,}50-(-0{,}50)} = \frac{0{,}70}{1{,}00} = 0{,}70$$

Расчет $I_{окр}$ (при типовых весах α_i) по формуле (8):

$$I_{окр} = 0{,}20 \cdot 0{,}70 + 0{,}15 \cdot 0{,}80 + 0{,}15 \cdot 0{,}70 + 0{,}20 \cdot 0{,}617 + 0{,}20 \cdot 0{,}556 + 0{,}1 \cdot 0{,}07 \approx 0{,}67 .$$

.

Полученное значение $I_{окр} \approx 0{,}67$ попадает в диапазон «средний уровень эффективности» (от 0,50 до 0,70), что свидетельствует о достаточной результативности интеграции РИ и одновременно указывает на резервы улучшения, прежде всего по показателям процессной и экономической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана многокритериальная математическая модель оценки эффективности интеграции реверс-инжиниринга в ОКР средств измерения и контроля, включающая систему из шести частных показателей (коэффициент вариативности, коэффициент объема изменений, коэффициент новизны, коэффициент сроков, коэффициент экономической эффективности и коэффициент метрологического соответствия), интегральный индекс $I_{окр}$ и алгоритм оценки с обратной связью. Математическая модель учитывает специфику многовариантных средств измерения и контроля, для которых точность измерений и полнота реализации вариантов исполнений имеют первостепенное значение.

Математическая модель допускает гибкую настройку под специфику конкретного предприятия: количество показателей может сокращаться для экспресс-оценки или дополняться отраслевыми критериями; весовые коэффициенты и граничные значения нормирования могут переопределяться экспертным путем.

Разработанная математическая модель предназначена для конструкторских и технологических подразделений машиностроительных и приборостроительных предприятий, реализующих программы импортозамещения и осуществляющих обратное проектирование многовариантных изделий. Ее применение позволяет:

– объективно оценить эффект от внедрения реверс-инжиниринга в ОКР;

– выявить недостатки процесса и определить приоритетные направления улучшений;

– обосновать управленческие решения о тиражировании модели интеграции РИ на другие проекты и продуктовые линейки;

– создать информационную основу для непрерывного совершенствования процесса ОКР в рамках системы менеджмента качества предприятия.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке корпоративных стандартов и регламентов по организации ОКР с применением реверс-инжиниринга, а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области управления качеством и инженерного проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 58675-2019. Система разработки и постановки продукции на производство. Управление данными об изделии. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – URL: https://base.garant.ru/72871164/ (дата обращения: 21.05.2026).
2. *Debnath, B.* Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review / B. Debnath, Z. Pourfarash, B. Ghorpade, S. Raman // MDPI Metrology. – 2025. – Vol. 5, No. 4. – Article 66. – DOI: 10.3390/metrology5040066.
3. *Vafadar, M.* A reverse engineering-based model for innovation process in complex product systems: Multiple case studies in the aviation industry / M. Vafadar, M. Shahriari, M. Ghafourian // Journal of Engineering and Technology Management. – 2023. – Vol. 75. – Article 101776. – DOI: 10.1016/j.jengtecman.2023.101776.
4. *Kropatschek, S.* Configuring and Validating Multi-aspect Risk Knowledge for Industry 4.0 Information Systems / S. Kropatschek, K. Meixner, D. Hoffmann, A. Lüder, S. Biffl // Advanced Information Systems Engineering. CAiSE 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 14663. – Springer, Cham, 2024. – DOI: 10.1007/978-3-031-61057-8_29.
5. *Фадеева, И.Г.* Научно-методические подходы к оценке эффективности НИОКР / И.Г. Фадеева, О.И. Гринюк, В.А. Кучерявый // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nauchno-metodicheskie-podhody-k-otsenke-effektivnosti-nauchno-issledovatelskih-i-opytno-konstruktorskih-rabot (дата обращения: 21.05.2026).
6. *Марат, Р.Т.* Комплексная оценка качества реверс-инжиниринга деталей / Р.Т. Марат, В.А. Иванов, С.А. Добрынин, Е.А. Соколова // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-otsenka-kachestva-revers-inzhiniringa-detaley (дата обращения: 21.05.2026).
7. ГОСТ Р 15.000-2016. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2016. – URL: https://base.garant.ru/71698268/ (дата обращения: 21.05.2026).
8. *Карелина, М.Ю.* Управление технологическими процессами реверсивного инжиниринга при решении задач импортозамещения в транспортной отрасли машиностроения Российской Федерации / М.Ю. Карелина, Н.В. Соловьев, Г.А. Мохова и др. – М.; Орел: Картуш, 2025. – 175 с.
9. *Азгальдов, Г.Г.* Квалиметрия: наука об измерении качества / Г.Г. Азгальдов, А.В. Костин. – М.: ЮНИТИ, 2020. – 312 с.
10. *Саати, Т.Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF INTEGRATION OF REVERSE ENGINEERING INTO THE CYCLE OF EXPERIMENTAL DESIGN WORK OF MEASURING AND CONTROL INSTRUMENTS

© 2026 D.V. Antipov[1], I.S. Vasin[2]

[1] Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia
[2] LLC "ULTRA GROUP OF COMPANIES", Samara, Russia

This article proposes a methodology for quantitatively assessing the effectiveness of integrating reverse engineering into the research and development process. A system of six specific indicators, grouped into technical, time, economic, and organizational blocks, has been developed. The indicators are standardized and condensed into an integrated process improvement index (Iокр) with weights determined using the analytic hierarchy process. The assessment algorithm includes a bottleneck analysis and iterative adjustments. The methodology is illustrated with a calculation based on data obtained during simulation modeling of the integration of reverse engineering into the research and development work of an electromagnetic flowmeter. The proposed methodology is universal, can be customized for specific industry conditions, and can be used to substantiate management decisions in mechanical engineering and instrument making industries.
Keywords: reverse engineering, experimental design work, effectiveness, integral index, partial indicators, multi-variant products, measuring and control instruments.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-141-146
EDN: RSJOST

REFERENCES

1. GOST R 58675-2019. System for the Development and Launch of Products into Production. Product Data Management. General Requirements. Moscow: Standartinform, 2019. Available at: https://base.garant.ru/72871164/ (Accessed: 21.05.2026).
2. *Debnath, B.* Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review / B. Debnath, Z. Pourfarash, B. Ghorpade, S. Raman // MDPI Metrology. 2025. Vol. 5, No. 4. Article 66. DOI: 10.3390/metrology5040066.
3. *Vafadar, M.* A reverse engineering-based model for innovation process in complex product systems: Multiple case studies in the aviation industry / M. Vafadar, M. Shahriari, M. Ghafourian // Journal of Engineering and Technology Management. – 2023. – Vol. 75. – Article 101776. – DOI: 10.1016/j.jengtecman.2023.101776.
4. *Kropatschek, S.* Configuring and Validating Multi-aspect Risk Knowledge for Industry 4.0 Information Systems / S. Kropatschek, K. Meixner, D. Hoffmann, A. Lüder, S. Biffl // Advanced Information Systems Engineering. CAiSE 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 14663. – Springer, Cham, 2024. – DOI: 10.1007/978-3-031-61057-8_29.
5. *Fadeeva, I.G.* Scientific and methodological approaches to assessing R & D effectiveness / I.G. Fadeeva, O.I. Grinyuk, V.A. Kucheryavy // CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nauchno-metodicheskie-podhody-k-otsenke-effektivnosti-nauchno-issledovatelskih-i-opytno-konstruktorskih-rabot (date of access: 21.05.2026).
6. *Marat, R.T.* Comprehensive Assessment of the Quality of Reverse Engineering of Parts / R.T. Marat, V.A. Ivanov, S.A. Dobrynin, E.A. Sokolova // CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-otsenka-kachestva-revers-inzhiniringa-detaley (accessed: 21.05.2026).
7. GOST R 15.000-2016. System for the Development and Launch of Products into Production (SRPP). Basic Provisions. – Moscow: Standartinform, 2016. – URL: https://base.garant.ru/71698268/ (accessed: 21.05.2026).
8. *Karelina, M.Yu.* Management of technological processes of reverse engineering in solving problems of import substitution in the transport industry of mechanical engineering of the Russian Federation / M.Yu. Karelina, N.V. Soloviev, G.A. Mokhova, et al. - Moscow; Orel: Kartush, 2025. - 175 p.
9. *Azgaldov, G.G.* Qualimetry: the science of measuring quality / G.G. Azgaldov, A.V. Kostin. - Moscow: UNITY, 2020. - 312 p.
10. *Saati, T.L.* Decision making. The method of analytic hierarchy process / T.L. Saati; translated from English. - Moscow: Radio and Communications, 1993. - 320 p.

Dmitry Antipov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering. E-mail: antipov.dv@ssau.ru
Ilya Vasin, Head of the Design Department. E-mail: sevaergurk@yandex.ru