

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 65.011.56:519.876.5, 629.12.001, 681.518: 004.685.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ
МЕТОДОМ КОРНЕВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМНЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

А.В. Алексеев, А.В. Михальчук, Ю.В. Корнева (Санкт-Петербург)

Актуальность. Методы системного анализа и оптимизации при цифровой трансформации общества привели к интенсивному развитию теории и практики моделирования организационно-технических систем и процессов [1, 2]. Их развитие, в свою очередь, позволило создать новый наиболее совершенный и высоко интеллектуализированный класс моделей – модели цифровых двойников (ЦД), в том числе объектов морской техники (ОМТ) и морской инфраструктуры (ОМТИ) [3-4].

При решении любой из прикладных задач, развитии методов моделирования, вместе с тем, наиболее значимыми являются методы структурной, функциональной, алгоритмической, программной, интерфейсной, ресурсной, информационной и, главное, системной оптимизации. В том числе по критерию максимума интегрального агрегированного (системного, обобщенного, генерального) показателя качества (АПК) ОМТИ [5-10], а также валидности (как меры достижения цели) и конкурентной способности (КС) ОМТИ [11].

При этом, оптимизация качества проектных решений (ПР) ОМТИ в целом $Q_{ПР}$ на стадии проектирования и создания, а также – эффективности эксплуатации как меры реализации $Q_{ПР}$ в процессе эксплуатации $Q_{ПР}$, где Q – значение качества ОМТИ, оцениваемое аналогично по методике оценки $Q_{ПР}$, но при вводе и пересчете данных, имеющих место при эксплуатации ОМТИ, приобретает сегодня особое значение.

Для оценки уровней АПК, проектного качества и эффективности эксплуатации, уровня валидности, конкурентной способности, военно-технического превосходства и т.п. в состав проектной, конструкторской и эксплуатационной документации должны включаться, и в ряде случаев в ТЗ предусмотрены, специализированные программные комплексы (ПК) подобных оценок («калькуляторы» качества ПР и эффективности ОМТ) проектного качества и эффективности эксплуатации ОМТИ [12-16].

Имея подобные ПК, задача оптимизации сводится, прежде всего, к числовому моделированию по параметрической оптимизации и вариантному поиску оптимального ПР с номером n_{opt} , как лучшего из всех альтернативных вариантов $n \in N$. При этом, в соответствии с теорией многокритериальной оптимизации n_{opt} определяется лично лицом, уполномоченным принимать решения (ЛПР), в соответствии с его предпочтениями типа

$$n_{opt} = \underset{n \in N}{\text{ArgOpt}}[\text{ЛПР}, \text{Max}_{n \in N}(Q_{ПР}), \dots], \quad (1)$$

где многоточие в условной записи алгоритма вариантной оптимизации предусматривает возможность регуляризации (доопределения) задачи оптимизации ОМТ на соответствующей итерации ее решения, причем, как следует из записи (1), главная роль при определении аргумента принадлежит исключительно ЛПР.

Постановка задачи исследования. В условиях наличия ПК оценки качества ПР ОМТ типа «Интеллектуальная система поддержки принятия решений и управления (ИСПРУ)» корабля класса «Фрегат» при решении задач борьбы за живучесть корабля сформулировать методические положения и методику ее вариантной оптимизации по критерию максимума военно-технического превосходства (конкурентной способности).

Состояние вопроса. В современных условиях тенденции роста сложности ОМТИ по структуре, функциональным возможностям и алгоритмам объектов автоматизации и их полимодельного анализа, включая переход к моделям класса ЦД, практически созданы условия перехода по-существу к системно замкнутому, единому циклу их комплексного моделирования от исследования путей совершенствования ОМТИ по отдельным частным показателям качества (ЧПК) до путей повышения проектного качества и эффективности эксплуатации ОМТИ по критерию АПК.

В свою очередь, многовариантность этой задачи при использовании имитационного, эвристического и подобных методов приводят, как известно, к возникновению проблемы множества альтернативных вариантов и соответствующих рисков выбора квазиоптимальных, либо субоптимальных вариантов при моделировании.

Направление и методология решения задачи. С учетом многообразия мнений в сообществе исследователей теории и практики многокритериальной оптимизации принято целесообразным и подтверждается успешной практикой преодолеть проблему вариантного множества, решить поставленную задачу исследования на основе анализа и ранжирования ПР по критерию $Max_{m \in [1, M]}$ индексов корневой чувствительности (ИКЧ_m) с номерами $m \in [1, M]$, оценки которых могут быть представлены в виде

$$Q_{\text{ПР}} = \underset{m \in [1, M]}{\text{ArgOpt}}[\text{ЛПР}, Max_{m \in [1, M]}(\text{ИКЧ}_m), \dots]. \quad (2)$$

Значение ИКЧ оценивается отношением вида

$$\text{И К Ч}_m = \frac{\Delta Q_m / Q_m}{\Delta X_m / X_m}, \quad (3)$$

где: $\Delta X_m / X_m$ – относительное приращению m -ого значения ЧПК;

$\Delta Q_m / Q_m$ – соответствующее относительное приращение АПК.

Причем, получаемое в результате оценивания множество значений ИКЧ и их комбинаций обязательно сопоставляется с соответствующим множеством ЧПК и АПК, анализируется и принимается при условии возможности технической реализации.

Ранее метод ИКЧ в силу сложности решаемых исследовательских задач оптимизации проектных решений, недостаточных возможностей вычислительных средств ограничивался длительным процессом теоретического обоснования моделей и, в лучшем случае, экспериментальной апробацией возможности реализации модели без масштабного исследовательского использования разработанной модели и средства ее реализации на широком спектре исходных данных. Сегодня эти сложности успешно преодолены, и реализация метода сводится к интерактивному целенаправленному поиску реализуемого варианта оптимизации проектного решения по совершенствованию ОМТ.

Методика оптимизации проектных решений ОМТ при использовании, например, Роботизированного проектного комплекса (РПК) «КСПР-2023» разработки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета [17] применительно к ОМТ типа ИСПРУ корабля класса «Фрегат» при решении задач борьбы за живучесть корабля сводится к последовательности процедур, изложенной далее.

1. **Системный анализ тенденций развития ОМТ** заданного класса «Фрегат» с обоснованием системы критериев оценки и соответствующих технических, системных показателей качества, включая агрегированный показатель проектного качества (АПК) для исходных данных ТЗ $Q_{\text{ПР}}$, ожидаемую эффективность эксплуатации $W = Q / Q_{\text{ПР}}$ (как меру реализации проектного качества, рассчитываемую по той же модели оценки АПК, но при условиях эксплуатации), конкурентную способность $КС = Q_{\text{ПР}} / Q_{\text{КР}}$ при значении

АПК для конкурентного решения $Q_{кр}$, валидность как меру достижения назначенных целей, перспективность развития (ПР, в сравнении с предыдущим этапом развития).

2. Выбор, либо разработку модели оценки проектного качества / эффективности ОМТ заданного класса и средств ее реализации. В том числе, выбор из базы данных и знаний (БДЗ) Заказчика, Исполнителя типа реестра моделей и программ, например, Федеральной службы по интеллектуальной собственности (ФСИС РФ, РОСПАТЕНТ), их ранжирование по критерию качества, например, с учетом и по методике [12, 13].

В целом это позволяет в итоге сформировать, например, в рамках технологии цифровых двойников [3, 15-17], так называемый цифровой паспорт (ЦП) ОМТ типа ИСПРУ для ОМТ класса «Фрегат», вариант интерфейсной формы которого при использовании, например, РПК «КСР-2023», приведен на рис. 1. Цифровой паспорт содержит сопоставимый набор исходных и оценочных данных для пяти вариантов, включая:

- 1) вариант «Требование ТЗ» на ИСПРУ по состоянию на 2017 г. (данные модельные);
- 2) вариант «1.СПРУ, 2015», соответствующий результату разработки в 2015 г.;
- 3) вариант развития «8.ИСПРУ-БЖК» по состоянию на 2018 г. (все данные модельные);
- 4) базовый вариант сравнения «9.ИСПРУ-ГК, 2020» по состоянию на 2020 г.;
- 5) вариант проектного решения «12.ИСПРУ-ОБЭ, 2022» по состоянию на 2022 г.

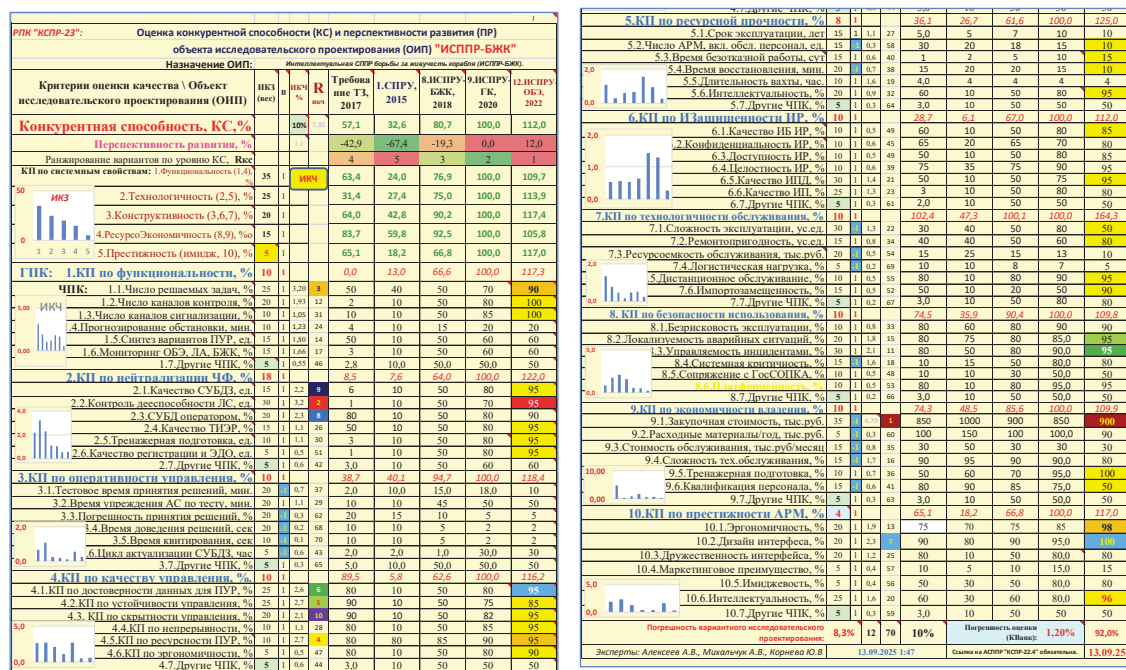


Рис. 1. Цифровой паспорт проектного решения «12.ИСПРУ-ОБЭ»

3. Анализ возможностей и применимости выбранной модели и средств ее реализации для класса решаемых задач моделирования, ОМТ класса «Фрегат» и типа объекта моделирования – ИСПРУ, включая специфику использования математического аппарата и возможности обоснования выбора исходных данных моделирования.

Так, при решении системных задач комплексного моделирования качества сложных организационно-технических систем, как показано в [12, 13], наиболее приемлемым следует считать класс квалитетических моделей, основными положениями математического аппарата которых приведены далее.

Реализация алгоритма оценки комплексного показателя качества (КПК) отдельного объекта моделирования (КПК) Q_k и агрегированного показателя качества (АПК) их системы Q [17, 20, 24] по модели (номера алгоритмов из источника)

$$Q_k = C_{k,M}^{t_M} \{w_m, C_{m,G}^{t_G} [w_g, C_{g,N}^{t_N} (w_n, q_n)]\}, \quad (1)$$

$$Q = C_P^{t_P} \{w_p, C_{p,R}^{t_R} [w_r, C_{r,K}^{t_K} (w_k, Q_k)]\}, \quad (2)$$

где:

$C_{g,N}^{t_N} (w_n, q_n)$ – обобщенный оператор свертки ЧПК q_n с общим их числом N и индексом критериальной значимости w_n в g -ый ГПК $C_{g,N}^{t_N}(\dots)$ по алгоритму типа t_N : A – для аддитивного (линейного) алгоритма, впервые предложенного А.Н. Крыловым; M – для мультипликативного алгоритма Д.Ф. Нэша; Γ – для гармонического (наиболее целесообразного при квалиметрических оценках) алгоритма и других алгоритмов свертки (первый уровень свертки показателей качества);

$C_{m,G}^{t_G} [w_g, C_{g,N}^{t_N}(\dots)]$ – обобщенный оператор свертки при соответствующих индексах критериальной значимости w_g ГПК с их общим числом G в -ый модельный (МПК) показатель качества (второй уровень свертки показателей качества ОА);

$C_{k,M}^{t_M} \{w_m, C_{m,G}^{t_G}[\dots]\}$ – обобщенный оператор свертки МПК в -ый комплексный, (интегральный, обобщенный, сводный) показатель (КПК) качества (четвертый уровень свертки показателей качества ОА).

Для системы объектов анализа с ЧПК, ГПК, МПК и КПК в модели (2) приняты следующие обозначения:

$C_{r,K}^{t_K} (w_k, Q_k)$ – обобщенный оператор свертки КПК Q_k с общим их числом K в r -ый сводный показатель качества (СПК) однородных ОА по алгоритму типа t_K (пятый уровень свертки показателей качества ОА);

$C_{p,R}^{t_R} [w_r, C_{r,K}^{t_K}(\dots)]$ – обобщенный оператор свертки СПК $C_{r,K}^{t_K}(\dots)$ с общим их числом R в p -ый модельный системный показатель качества (МСПК) разнородных, либо однородных ОА по алгоритму типа t_K (шестой уровень свертки показателей качества);

$C_P^{t_P} \{w_p, C_{p,R}^{t_R}[\dots]\}$ – обобщенный оператор свертки МСПК $C_{p,R}^{t_R}[\dots]$ с общим их числом P в полимодельный агрегированный показатель качества (АПК) системы ОА по алгоритму типа t_P (седьмой уровень свертки показателей качества ОА).

Данная модель реализована в РПК «КСР-2023» [17], главная экранная форма которого в виде цифрового паспорта ИСПРУ приведена на рис. 1.

4. Формирование исходных данных моделирования с систематизацией и формулировкой системы взаимосвязанных понятий, задач по предназначению, системы базовых теоретических и практических положений по концепции развития ИСПРУ ОМТ класса «Фрегат», системы основных свойств (на рис. 1 приведены 5 свойств в виде конкурентного превосходства (КП) по отношению к варианту сопоставления «9.ИСПРУ-ГК, 2020») и определяющим их групповым показателям качества (на рис. 1 приведены 10 ГПК) и характеризующих их ЧПК (по 7 для каждого ГПК) с соответствующими индексами критериальной значимости (ИКЗ, весовыми коэффициентами) и индексами влияния (+1/-1) на значение АПК (В), с представлением структурной и функциональной модели, технологическим обоснованием способов ее реализации, с выбором способов анализа и синтеза проектного решения ИСПРУ в целом и оценкой погрешностей вводимых исходных данных (в нижней части рис. 1 (справа) принято среднее значение

10% при числе сравниваемых вариантов ПР 12 (на рис. 1 показаны только 5 наиболее значимых) и введенных 70 ЧПК.

5. Автоматическая расчетная оценка в РПК «КСР-2023» комплекса системных показателей по каждому из вариантов ПР в составе ГПК, КП по системным свойствам, ПР и КС с ранжированием вариантов ПР по уровню КС/ВТП ($R_{кс}$) в сравнении с базовым вариантом сравнения «9.ИСПРУ-ГК, 2020».

6. Анализ и интерпретация полученных результатов на предмет моделируемости ИСПРУ по критериям и показателям:

- адекватности модели (достаточности и точности отображения свойств ИСПРУ и т.п.);
- функциональности модели (возможности модельного отображения всех значимых свойств ИСПРУ и условий ее использования);
- конечности модели (числа отображаемых свойств и отношений);
- чувствительности модели (к внутренним и внешним факторам использования ИСПРУ);
- интеллектуальности модели (способности отображать нетиповые факторы и условия);
- управляемости модели (по доли управляемых исходных данных по объекту и условиям);
- результативности и доступности модели, верификации решенных задач и степени достижения цели моделирования (валидности) с фиксацией результатов анализа, например, в ПК «КМ.4» [12].

7. Оценка необходимости и возможная корректировка используемых исходных данных моделирования, включая учет погрешности их ввода и погрешность получаемых результатов (на рис. 1 соответственно 10%, 8,3% (погрешность вариантной оптимизации), 1,2% (погрешность (коэффициент вариации) оценки АПК), 92% (достоверность оценок).

8. Решение задачи параметрической, а при необходимости, структурной и алгоритмической оптимизации ПР ОМТ типа ИСПРУ для ОМТ класса «Фрегат» путем:

8.1 Запуска макроса «ИКЧ» (рис. 1) для оценки по модели (3) матрицы значений ИКЧ КС оптимизируемого варианта ОМТ «12.ИСПРУ-ОБЭ, 2022» и их ранжирования (Рикч) с целью выбора наиболее значимых для последующего обоснования путей совершенствования ОМТ (рис. 2).



Рис. 2. Результаты ранжирования индексов корневой чувствительности КС ИСПРУ

8.2. Инженерно-технической оценки возможности и степени совершенствования ПР ИСПРУ в части ЧПК 9.1, 2.2, 1.1, 4.5 и т.д. Вариант решения данной задачи приведен на рис. 1 и показывает, что в результате комплексного числового моделирование в данном варианте ПР удалось достигнуть значение $КС = 112\%$, что весьма значительно.

8.3. Оценки необходимости и возможной корректировки исходных данных по результатам решения задачи параметрической оптимизации ПР ИСПРУ.

8.4. Обоснования альтернативных вариантов решения задачи оптимизации ПР ИСПРУ по методике п. 8.1-8.3 с регистрацией соответствующих вариантов в БДЗ РПК «КАСПР-2023» типа «12.2.ИСПРУ-ОБЭ» и т.д. (на рис. 1 не приведены).

8.5. Принятия оптимального решения по выбору ПР (лучшего из альтернативных) для последующего его регистрации, оформления в проектной документации и представления на апробацию в экспертный совет, совещание специалистов и т.п.

9. Систематизация полученных результатов, определение путей перспективного развития и эффективной реализации разработанного оптимального варианта ПР ИСПРУ для ОМТ класса «Фрегат» с разработкой маршрутной (дорожной) карты, оценками верификации и валидности и т.п. для утверждения главным конструктором ИСПРУ и главным конструктором ОМТ класса «Фрегат» (при необходимости).

Естественно, представленная методика оптимизации проектных решений объектов морской техники типа ИСПРУ для ОМТ класса «Фрегат» методом корневой чувствительности системных показателей качества может углубляться и уточняться, но базовые девять ее положений и «шагов» обеспечивают решение задачи оптимизации ПР с существенно меньшим набором вариантного поиска в сравнении с другими методами.

Выводы

Цифровая трансформация общества привела к интенсивному развитию теории и практики комплексного моделирования сложных организационно-технических систем и процессов, включая создание высшей формы комплексного моделирования и модели класса ЦД, в составе «цифрового паспорта» которых может быть и уже использована в [17] представленная методика оптимизации.

Методы оптимизации в имитационном и комплексном моделировании при решении любой из прикладных задач являются наиболее значимыми. Они позволяют обосновывать проектные предложения по совершенствованию объекта моделирования.

Еще большее значение они имеют при параметрической оптимизации системных показателей качества объектов и их групп, так как позволяют при их реализации, как показано на примере РПК «КАСПР-23» разработки Санкт-Петербургского ГМТУ по приведенной методике на примере оптимизации ПР ОМТ типа АСППР в варианте ИСПРУ для ОМТ класса «Фрегат», систематизировать и актуализировать теоретические и практические положения по развитию АСППР в базе данных и знаний РПК «КАСПР-2023», цифровизовать преимущественные свойства, критерии и показатели качества, в первую очередь, по системным показателям качества АСППР, их валидности и военно-технического превосходства.

Авторы выражает искреннюю благодарность профессору Соколову Б.В., контр-адмиралу Дриголе В.К., заведующему кафедрой доценту Согонову С.А., профессору Хруцкому О.В, профессору Равину А.А. за многолетнее творческое сотрудничество, помощь, творческое обсуждение и поддержку при подготовке настоящей статьи.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» от 6 ноября 2021 г. N 3142-р.
2. Библиотека цифровых моделей и виртуальный полигон для выполнения цифровых двойников / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019612794, 28.02.2019. Заявка № 2019611680 от 20.02.2019.
3. Цифровой двойник системы комплексной защиты информации в инвариантном исполнении (ЦД СКЗИ) /Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023662162, 23.06.2023.
4. **Согонов С.А., Алексеев А.В., Максимова М.А., Хруцкий О.В., Равин А.А., Михальчук А.В.** Модель и технология цифровых двойников систем автоматизации судов / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой международной научно технической конференции. – СПб : Изд-во СПбГМТУ, 2023.
5. **Смольников А.В., Сус Г.Н., Ушакова Н.П.** Когнитивные технологии системы поддержки принятия решений и управления борьбой за живучесть корабля, судна //Системы управления и обработки информации: научн.-техн. сб. /АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб, 2019. Вып. 3(46), с. 18-27.
6. **Тычинин И.Ю., Алексеев А.В., Худобородов Е.Ф.** Теория практики системного обоснования требований и путей обеспечения военно-технического превосходства ВМФ / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы восьмой международной научно-технической конференции в рамках Третьего Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». – СПб.: СПбГМТУ, 2019, с. 251-357.
7. **Прохоров А., Лысачев М.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.:ООО «АльянсПринт», 2020.–401 с.
8. **Жиляев А.А.** Методы и средства построения «цифровых двойников» процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий / Автореф. дисс. к.т.н., 2021. (ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева»).
9. **Пантюхин О.В.** Разработка методологии управления качеством продукции ответственного назначения на основе цифровых двойников технологических процессов и изделий (на примере изготовления гильз для высокоэффективных патронов) / Автореф. дисс. д.т.н., 2021. (Тульский государственный университет).
10. **Воробьев А.В.** Методологические основы обработки пространственной информации для поддержки принятия решений на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных) / Автореф. дисс. д.т.н., 2021, 32 с.
11. **Соколов Б.В., Алексеев А.В.** Моделирование сложных систем: эволюция взглядов и концепций, полимодельные комплексы, проблемы и направления развития / Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г., Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021, с. 83-88.
12. **Алексеев А.В.** Методика инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники и морской инфраструктуры / Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies, № 1 том 2, 2021, с. 60-67 / № 1 part 2, 2021, р. 60-67.

13. **Алексеев А.В.** Примеры реализации полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры / Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies, № 2 (52) том 3, 2021, с. 69-81.
14. Программа квалиметрического анализа, синтеза и оптимизации решений (КАСОП) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023616388, 27.03.2023.
15. Цифровой мониторинг, прогнозирование и контроль успешности реализации комплекса организационно-технических решений (ЦМПК) /Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023661669, 1.06.2023.
16. Программный комплекс системной поддержки принятия решений и управления (СПРУ) /Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023616019, 21.03.2023.
17. Роботизированный проектный комплекс оценки и максимизации конкурентной способности и перспективности развития эргатических систем (РПК КСПР) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2024615534, 20.03.2024.