

Специализированная САПР информационно-измерительных устройств командных приборов

Р. И. Сольницев¹, Я. Л. Шамрай^{2✉}, Д. О. Якимовский¹, Д. С. Положенцев³

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² 2000 «ДизайнСофт», Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

✉ yago1987@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема построения специализированной САПР информационно-измерительных устройств командных приборов. Определен перечень проектных операций, подлежащих автоматизации. Рассмотрено дерево задач, подлежащих решению при разработке рассматриваемой САПР. Предложены подходы к решению этих задач в части математического, информационного, лингвистического и программного обеспечения. Описан предлагаемый проблемно-ориентированный язык для описания структуры проектируемого устройства. Предложена расширяемая архитектура специализированной САПР на основе объектно-ориентированной системы управления базами данных.

Ключевые слова: информационно-измерительные устройства, системы автоматизированного проектирования, командные приборы, моделирование, проблемно-ориентированный язык, архитектура программного обеспечения

Для цитирования: Специализированная САПР информационно-измерительных устройств командных приборов / Р. И. Сольницев, Я. Л. Шамрай, Д. О. Якимовский, Д. С. Положенцев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 10. С. 45–57. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-45-57.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Specialized CAD for Information-Measuring Devices of Command Instruments

R. I. Solnitsev¹, Ia. L. Shamrai^{2✉}, D. O. Yakimovsky¹, D. S. Polozhentsev³

¹ Saint-Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² DesignSoft LLC, Saint Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

✉ yago1987@yandex.ru

Abstract. Reviewed the problem of building a specialized CAD for information-measuring devices of command instruments. The list of automated design operations is defined. The tree of tasks to be solved during the development of the specialized CAD is considered. Approaches to the development of mathematical, informational, linguistic and software tools are proposed. The proposed problem-oriented language for describing the structure of the designed device is considered. An extensible architecture of specialized CAD based on object-oriented database management system is proposed.

Keywords: information-measuring devices, computer-aided design systems, command instruments, modeling, problem-oriented language, software architecture

For citation: Solnitsev R. I., Shamrai Ia. L., Yakimovsky D. O., Polozhentsev D. S. Specialized CAD for Information-Measuring Devices of Command Instruments // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 10. P. 45-57. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-45-57.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Командные приборы (КП) – особый класс навигационных приборов, предназначенных для навигации и управления аэрокосмическими объектами [1]. К основным элементам командных приборов относятся цифровые преобразователи угла, представляющие собой информационно-измерительные устройства (ИИУ), решающие задачу измерения углового положения. Далее будем обозначать такие устройства как ИИУ КП.

К разрабатываемым в настоящее время ИИУ КП предъявляются все более высокие требования по точности, быстродействию, надежности, массе, габаритам, стоимости [2].

Общая тенденция современной техники заключается в усложнении структур систем и устройств и в увеличении объема выполняемых ими функций. Это в полной мере справедливо и для ИИУ КП.

Все вышесказанное приводит к необходимости разработки и широкого внедрения в повседневную практику систем автоматизированного проектирования (САПР) ИИУ КП. Применение САПР обеспечивает возможность повышения качества устройств, снижения материальных затрат и сокращения сроков разработок.

На сегодня существует большое количество средств автоматизации, обеспечивающих решение самых разных задач разработчиков, конструкторов, технологов, испытателей в процессе проектирования приборов и систем управления. В большинстве своем существующие инструменты САПР ориентированы на широкий спектр проектируемых объектов, а также на конкретный вид проектирования: алгоритмическое, функциональное, конструкторское, технологическое и т. п. При этом на стадии эскизного проекта наиболее важные и ответственные виды проектирования – алгоритмическое и функциональное – зачастую автоматизируются средствами общего назначения. Задача учета специфики объекта проектирования в таком случае возлагается на проектировщика, что повышает вероятность ошибок и снижает производительность труда.

Обозначенная проблема в полной мере относится к ИИУ КП. Адаптация существующих систем моделирования общего назначения для учета специфики ИИУ КП при выполнении алгоритмического и функционального проектирования представляется не очень эффективным решением по целому ряду причин. Эти причины рассматриваются далее по тексту настоящей статьи. Как следствие, актуальной научной проблемой стала разработка специализированной САПР ИИУ КП, вопросам построения которой эта статья и посвящена.

Актуальность разработки и дерево задач. В настоящее время проектирование ИИУ КП на алгоритмическом и функциональном уровне реализуется методом сравнительного анализа, суть которого сводится к сопоставлению характеристик ряда эвристически выбранных вариантов построения устройства. Совокупность проектных операций, отвечающих данному методу при проектировании ИИУ КП, представлена на рис. 1.

Один из важнейших критериев для выбора наиболее рационального варианта построения ИИУ КП заключается в удовлетворении требований по точности. В этом случае основная цель моделирования состоит в определении характеристик погрешностей результатов измерений и, в конечном счете, ожидаемых метрологических характеристик ИИУ КП, т. е. должна быть решена задача метрологического анализа.

Необходимо отметить, что формирование модели конкретного варианта устройства, позволяющей решить поставленную задачу на ЭВМ, может осуществляться разными способами и один из наиболее популярных – построение модели устройства в виде структурно-функциональной схемы. Проектировщик в этом случае строит схему устройства, оперируя готовыми библиотечными блоками, моделирующими типовые элементы объекта проектирования.

Указанный способ положен в основу программных пакетов моделирования общего назначения – Simulink, SysCalc, SystemVue, LabVIEW, Hypersignal RIDE, VisSim, Visual System



Рис. 1. Процедура проектирования
Fig. 1. Design procedure

Simulator. Перечисленные системы, обладая такими достоинствами, как обширные библиотеки стандартных блоков, удобный пользовательский интерфейс, возможности взаимодействия модели с реальной аппаратурой, имеют ряд существенных недостатков в контексте задачи по моделированию ИИУ КП:

- не ориентированы на выполнение метрологического анализа, что требует от проектировщика большого количества дополнительных действий при построении и при использовании модели ИИУ КП;

- не содержат готовых моделей первичных измерительных преобразователей ИИУ КП, возлагая задачу их построения на проектировщика;

- не содержат встроенных средств для оценки вычислительных погрешностей в ходе выполнения вычислительного эксперимента;

- существенно ограничивают возможное применение языков программирования общего назначения и сторонних программных библиотек при расширении библиотеки блоков;

- не ориентированы на автоматизацию документирования проектного решения;

- не удовлетворяют актуальным требованиям по импортозамещению.

В силу перечисленных недостатков существующих систем, разработка специализированных средств автоматизации, в полной мере удовлетворяющих предъявляемым требованиям, представляется весьма актуальной.

Разработка специализированной САПР ИИУ КП представляет собой достаточно сложный процесс и предполагает решение целого ряда научно-технических задач. Дерево задач представлено на рис. 2.

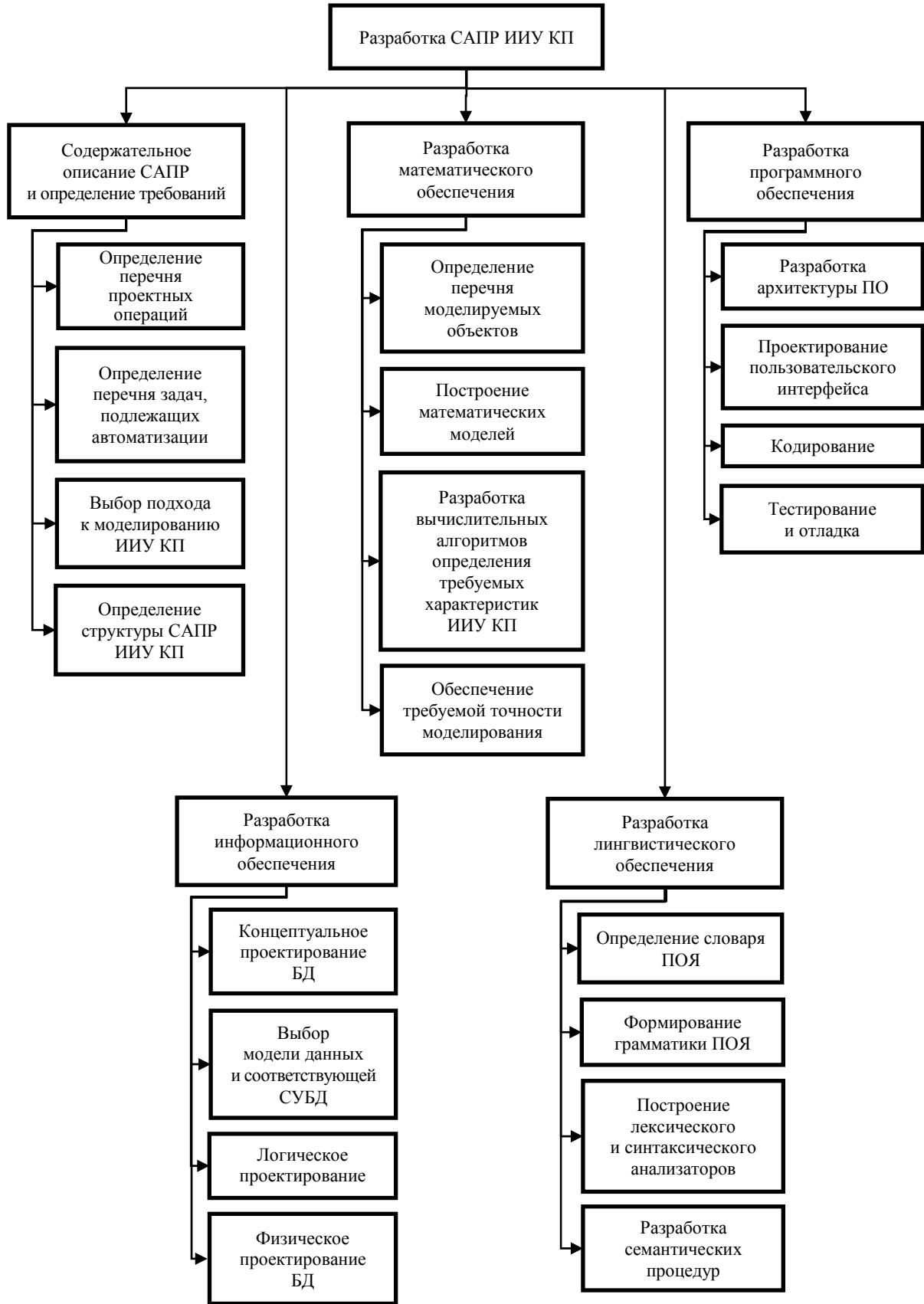


Рис. 2. Дерево задач разработки специализированной САПР
Fig. 2. Task tree for the development of specialized CAD

В следующих разделах настоящей статьи указанные задачи и подходы к их решению рассматриваются подробнее.

Содержательное описание разрабатываемой системы автоматизации. Разрабатываемая система предназначена для выполнения метрологического анализа альтернативных вариантов построения ИИУ КП на этапах алгоритмического и функционального проектирования.

Рассмотрим совокупность проектных операций, выполняемых разработчиком ИИУ КП, и определим перечень задач, процесс решения которых должен быть автоматизирован. Такие операции, как определение перечня задач, решаемых устройством, выбор алгоритма решения задач, а также выбор элементной базы, плохо поддаются автоматизации в силу их существенно неформального характера. Следовательно, автоматизации подлежат следующие основные операции:

- формирование альтернативных вариантов структурной и функциональной схем;
- определение характеристик альтернативных вариантов и отбраковка;
- документирование проектного решения.

Детализация указанных операций зависит от выбранного подхода к моделированию и, кроме того, от входного языка, на котором пользователь описывает моделируемое устройство.

Одним из наиболее эффективных подходов к моделированию ИИУ КП представляется имитационное моделирование (ИМ) на ЭВМ, предполагающее замену изучаемой системы имитационной моделью. Под имитационной моделью будем понимать моделирующий алгоритм, воспроизводящий поведение исследуемого объекта во времени при воздействии на него различных (как правило, случайных) факторов.

Наличие в измерительном тракте программируемого цифрового процессора усложняет решение задачи метрологического анализа проектируемого устройства. Аналитические методы, с успехом применяемые к аналоговой части ИИУ КП, не подходят для определения вероятностных характеристик погрешностей цифровой части, что обуславливает необходимость применения ИМ.

В то же время, имитационное моделирование аналоговой части ИИУ КП сопряжено с трудностями обеспечения достоверности имитационных моделей аналоговых элементов. Следовательно, разрабатываемая САПР должна иметь организацию, позволяющую применять тот или иной подход по выбору проектировщика. Для простоты

дальнейшего изложения будем считать, что в качестве базового подхода выбрано имитационное моделирование.

Общее требование, предъявляемое к САПР ИИУ КП, независимо от выбранного подхода к моделированию заключается в блочном принципе реализации моделей, позволяющем проектировщику варьировать не только параметры устройства, но и его структуру. Блочный принцип предполагает, что модель любого устройства формируется посредством «соединения» моделей отдельных его блоков. В качестве таких блоков могут выступать модели реальных элементов ИИУ КП, а также модели отдельных операций по переработке информации.

Входные языки можно условно разделить на две категории: ориентированные на описание функционирования моделируемого устройства и на описание структуры моделируемого устройства [3], [4]. Будем рассматривать в качестве основной вторую категорию, поскольку структурный подход в большей степени отвечает требованиям конечного пользователя, позволяет описывать моделируемое устройство как совокупность элементарных объектов предметной области и связей между ними. В данном случае элементарные объекты – это уже упомянутые блоки устройства, представленные соответствующими моделями. Предполагается наличие в составе САПР необходимой библиотеки моделей блоков, каждая из которых программно реализована разработчиком САПР.

Таким образом, операция формирования подлежащих анализу альтернативных вариантов ИИУ КП включает:

- выбор моделей блоков из библиотеки;
- организация связей между моделями блоков;
- задание параметров моделей блоков.

Определение характеристик альтернативных вариантов ИИУ КП в разрабатываемой САПР базируется на операторном описании измерительных преобразований [5]. Устройство в целом соответствует уравнение измерений, включающее операторы преобразования, введенные для каждого из его элементов. Например, для одноканального устройства, включающего первичный измерительный преобразователь (ПИП), нормирующий преобразователь (НП), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а также микропроцессор (МП), уравнение измерений может быть записано в виде

$$y_j^* = R_{МП} R_{АЦП} R_{НП} R_{ПИП} x_j, \quad (*)$$

где x_j – входное воздействие в j -м измерительном эксперименте; y_j^* – результат измерения, отвечающий входному воздействию; $R_{МП}$, $R_{АЦП}$, $R_{НП}$, $R_{ПИП}$ – операторы преобразования, соответствующие элементам устройства.

Каждый из указанных операторов соотносится с программно реализованной моделью блока. Настраивая параметры модели блока, можно имитировать неидеальность выполняемого им преобразования. Поскольку при метрологическом анализе определению подлежат прежде всего такие характеристики, как математическое ожидание и дисперсия погрешности результата измерения, то вычислительный эксперимент при выполнении ИМ сводится к следующему:

- многократный «прогон» модели устройства с идеальными блоками для различных входных данных;

- многократный «прогон» модели устройства с неидеальными блоками для тех же наборов данных;

- определение погрешностей как разницы результатов идеальной и неидеальной реализации алгоритма для каждого из наборов данных;

- оценка искомых вероятностных характеристик с помощью статистических методов.

Что касается документирования проектного решения, принимаемого разработчиком ИИУ КП по результатам эксперимента, то выполнение данной операции должно быть обеспечено организацией хранения модели устройства в базе данных (БД) проекта. При этом подготовка документации по установленной форме должна выполняться автоматически соответствующим программным модулем.

Исходя из изложенной детализации проектных процедур, состав разрабатываемой САПР может быть определен следующим образом:

- модули, реализующие модели блоков;
- БД типовых элементов (хранит сведения о моделях блоков);

- модуль управления БД типовых элементов;
- транслятор языка описания модели устройства;

- БД проекта (хранит модель устройства и результаты вычислений);

- модуль управления БД проекта;

- модуль выполнения вычислительного эксперимента;

- модуль ввода-вывода;

- модуль документирования;

- основной модуль, интегрирующий все компоненты.

Проблемная ориентация САПР осуществляется за счет реализации моделей блоков, специфичных для проектируемого устройства (в данном случае – ИИУ КП). Кроме того, предполагается использование объектной модели [6], отражающей особенности предметной области – как самого устройства, так и проводимого вычислительного эксперимента. Объектная модель служит основой для построения БД типовых элементов, БД проекта, а также всех программных модулей.

Разработка математического обеспечения.

Для выполнения метрологического анализа ИИУ КП необходимо построение следующих составляющих математического обеспечения:

- модель входного воздействия;
- модель условий измерения;
- модель процедуры измерений;
- модели измерительных модулей.

Указанные составляющие входят в так называемую модель измерительной ситуации [7].

В принятой терминологии устройству в целом отвечает модель процедуры измерений. На этапе разработки САПР определяется только ее вид, в простейшем случае отвечающий (*), в то время как сама модель строится пользователем на этапе использования инструментов САПР.

Модели измерительных модулей есть модели блоков устройства, выполняющих измерительные преобразования. Именно эти модели, будучи реализованными программно, подлежат хранению в БД типовых элементов и используются при построении модели устройства.

Модель входного воздействия определяется следующим образом:

$$MM_x = (x(t), x \in [x_{\min}; x_{\max}], \omega(x(t))),$$

где $x(t)$ – входное воздействие; $\omega(x(t))$ – n -мерная плотность распределения вероятности $x(t)$.

Модель условий измерения призвана отразить внешние влияющие факторы и может быть задана, например, следующим образом:

$$MM_y = x'(t) = g[x(t)] + n(t), \{\alpha_s\}_{s=1}^{S_\alpha},$$

где $x'(t)$ – входное воздействие под влиянием аддитивно-мультипликативной помехи; α_s – параметры окружающей среды.

Для удобства использования в составе САПР модели входного воздействия и условий измерения, будучи реализованными программно, могут быть помещены в БД типовых элементов аналогично моделям измерительных модулей. При этом следует предусмотреть в БД отдельные каталоги в соответствии с классификацией типовых элементов.

Все перечисленные модели должны быть адаптированы для выполнения вычислительного эксперимента в соответствии с выбранным подходом. В случае выполнения ИМ данное требование подразумевает представление блоков устройства в виде моделирующих алгоритмов, воспроизводящих изменения во времени случайных величин, входящих в состав используемых математических соотношений.

Разработка моделирующих алгоритмов блоков ИИУ КП представляет собой сложную задачу, при решении которой необходимо учитывать целый ряд требований.

Во-первых, эта задача неразрывно связана с представлением времени в ИМ [8]. В ИМ имеются три понятия времени: физическое, модельное и процессорное. Физическое время относится к моделируемой системе. Модельное время – воспроизведение физического времени в модели. Процессорным временем называется время выполнения имитационной модели на компьютере.

Управление модельным временем и активация отдельных элементов модели в нужной последовательности должны осуществляться специальной подпрограммой, разрабатываемой в составе модуля выполнения вычислительного эксперимента. Эту подпрограмму называют монитором или планировщиком событий, который действует в соответствии с потактовым или событийным алгоритмом моделирования [3], [8].

Для обеспечения достоверности результатов ИМ алгоритмы, воспроизводящие поведение отдельных блоков моделируемого устройства во времени, должны быть согласованы с выбранным алгоритмом монитора моделирования.

Во-вторых, при моделировании ИИУ КП (как и других прецизионных устройств) необходимо обеспечить адекватное воспроизведение разрешающей способности каждого отдельного элемента устройства, а также контроль ошибок округления в ходе выполнения вычислительных алгоритмов. Для решения этой задачи одним из авторов настоящей статьи предложен метод автоматизированной оценки трансформированных и вычислительных погрешностей [9].

Разработка информационного обеспечения.

Один из центральных вопросов при построении специализированной САПР ИИУ КП – разработка информационного обеспечения. К информационному обеспечению относят, прежде всего, базы данных (БД) и системы управления базами данных (СУБД), представляющие в совокупности так называемые банки данных (БнД).

Очевиден тот факт, что структура БД САПР должна учитывать специфику объекта проектирования. В частности, БД специализированной САПР ИИУ КП должна хранить данные рассмотренных нами ранее математических моделей, а также вспомогательные данные для организации вычислительного эксперимента в соответствии с выбранным подходом к моделированию. В силу высокой сложности организации перечисленных данных как таковых выбор модели их представления существенно влияет на весь процесс разработки специализированной САПР.

Создание БД включает следующие основные этапы:

- создание концептуальной модели (системный анализ);
- логическое конструирование;
- физическое конструирование.

Практика показала, что наиболее распространенная сегодня реляционная технология мало пригодна для работы со сложными объектами, встречающимися в САПР [10]–[13]. К ограничениям реляционной технологии следует отнести следующее:

– реляционная модель данных не допускает естественного моделирования данных со сложной структурой, поскольку в ее рамках возможно моделирование лишь с помощью плоских отношений (таблиц);

– реляционная модель данных не позволяет определить набор операций, связанных с данными определенного типа, что является естественным требованием при моделировании данных со сложной структурой (операции приходится задавать в конкретном приложении);

– реляционная модель данных не позволяет рассматривать данные послойно, на различных уровнях абстракции, при необходимости отвлекаясь от ненужных деталей;

– интерфейс между языками программирования и баз данных обычно усложнен, поскольку каждый язык имеет свой набор типов и свою модель вычислений.

Устранить эти ограничения призваны объектно-ориентированные базы данных (ООБД) и соответствующие системы управления базами данных (ООСУБД). Данные в ООБД хранятся не в виде таблиц, а как набор объектов. Отсутствие необходимости отображения сложных структур на таблицы позволяет повысить производительность их обработки. Кроме того, процесс создания специализированной БД ускоряется, поскольку кон-

цептуальный и логический уровни ее проектирования опираются на единую объектную модель. ООСУБД расширяет возможности объектно-ориентированных языков программирования (ООЯП), реализуя систему хранения объектов.

Исходя из изложенного, в процессе разработки информационного обеспечения специализированной САПР ИИУ КП необходимо:

- построить объектную модель данных, которая должна отражать специфику ИИУ КП и выбранного подхода к моделированию;
- выбрать существующий ООЯП для программной реализации объектной модели;
- выбрать существующую (или разработать новую) ООСУБД, совместимую с выбранным ООЯП и позволяющую эффективно хранить и обрабатывать данные объектной модели.

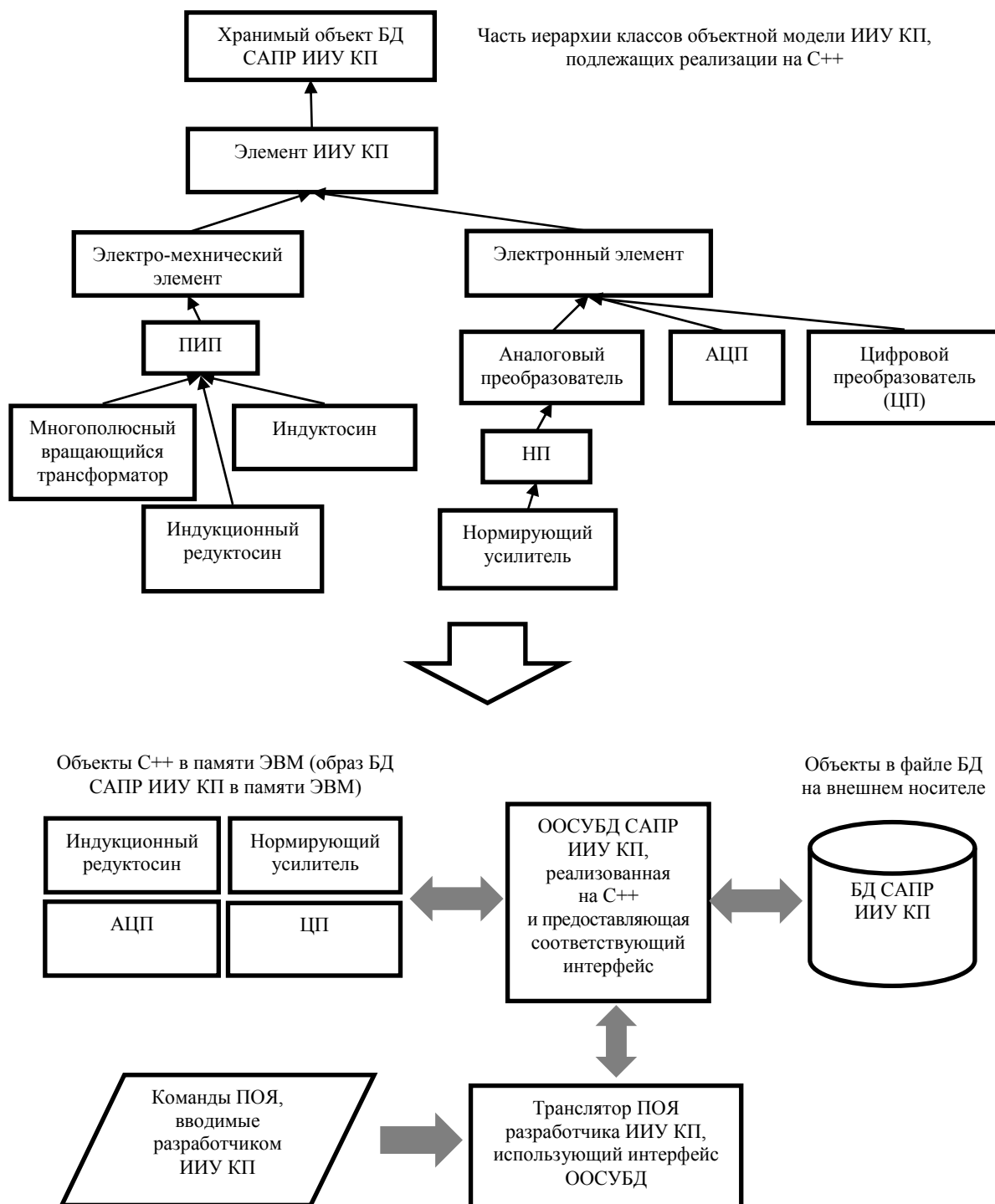


Рис. 3. Применение ООСУБД при разработке специализированной САПР
 Fig. 3. OODBMS in the development of specialized CAD

ООЯП в данном случае выступает в качестве языка манипулирования данными (ЯМД).

Следует отметить, что выбранный ООЯП – это язык разработчика САПР ИИУ КП, в то время как пользователю-проектировщику для взаимодействия с БД должен быть предоставлен проблемно-ориентированный язык (ПОЯ), не требующий навыков программирования. При этом каждая команда ПОЯ может отвечать целому набору действий на ООЯП.

Предлагаемый подход применительно к САПР ИИУ КП упрощенно проиллюстрирован на рис. 3 в предположении, что языком разработчика САПР является язык C++.

Разработка лингвистического обеспечения.

В качестве пользовательского языка САПР ИИУ КП предлагается использовать ПОЯ, относящийся к языкам описания структуры. Для описания исследуемой структуры языки данного типа располагают элементарными объектами (в нашем случае – ПИП, НП, АЦП и т. д.). Предполагается, что функции, выполняемые отдельными элементами, известны пользователю. Подобные языки обычно позволяют также описывать более сложные объекты на основе элементарных узлов (например, измерительные каналы, состоящие из

конкретных преобразователей), включать их в библиотеки стандартных элементов. Существенно, что для пользователя все объекты с точки зрения функционирования – это «черные ящики», имеющие определенные наборы входных и выходных контактов, а также параметры, влияющие на функционирование «черного ящика». Алгоритмы функционирования и программы, их реализующие, оказываются скрытыми от пользователя.

Преимущество языков такого типа заключается в простоте их освоения.

Недостатком является сложность включения в состав операторов такого языка новых элементарных объектов, которые невозможно или неэффективно описывать как некоторую структуру, составленную из имеющихся элементарных объектов, поскольку в этом случае требуются изменения транслятора.

Указанный недостаток устраняют, ориентируя ПОЯ на работу с базой данных элементов [3]. При этом функциями языка остаются отбор используемых в модели ИИУ КП элементов, описание связей между ними, задание параметров. Функции описания и хранения элементарных объектов возлагаются на БД.

Табл. 1. Команды выбора элементов из каталога
Tabl. 1. Commands for selecting items from the catalog

Команда	Действие команды
listcat()	Вывести на экран список каталогов с типовыми элементами устройства
catalog(catalogName)	Выбрать в качестве текущего каталог элементов с именем, заданным строкой catalogName
listelem()	Вывести на экран список элементов текущего каталога
elem(elemNumber)	Выбрать в качестве текущего элемент с номером по каталогу, заданным целым числом elemNumber
position(number)	Указать позицию текущего элемента в модели устройства (позиция задается целым числом number)
delete(number)	Удалить элемент из позиции, заданной целым числом number

Табл. 2. Команды работы с выбранными элементами и моделью в целом
Tabl. 2. Commands for working with selected elements and the model

Команда	Действие команды
select(number)	Выбрать в качестве текущего элемент, расположенный в модели на позиции number
connect(contactOfCur, relatedItemPos, contactOfRelatedItem)	Установить связь контакта под номером contactOfCur текущего элемента с контактом под номером contactOfRelatedItem элемента на позиции relatedItemPos (при выполнении команды осуществляется проверка на допустимость связи по информации БД элементов)
desc()	Вывести на экран описание параметров и контактов текущего элемента
param(index, arg)	Присвоить параметру с индексом index значение arg (аргумент может быть числом с плавающей точкой или целым, семантика проверяется по данным БД).
list()	Вывести на экран список элементов модели

С точки зрения семантики можно выделить две группы команд предлагаемого ПОЯ:

- команды выбора элементов из каталога (БД);
- команды работы с выбранными элементами

и моделью в целом.

Первая группа команд описана в табл. 1, вторая группа – в табл. 2.

Имена команд являются ключевыми словами предлагаемого ПОЯ.

Синтаксис предлагаемого ПОЯ может быть записан в форме Бэкуса–Наура следующим образом:

```
Program ::= Operators
Operators ::= Function | Operators
Function ::= FunWithNoArg | FunOfOneVariable |
FunOfSeveralVars
FunWithNoArg ::= LITERAL '(' ')'
FunOfOneVariable ::= LITERAL '(' Expr ')'
FunOfSeveralVars ::= LITERAL '(' ExprSequence ')'
Expr ::= LITERAL | FLOAT_VAL | NUMBER |
Function | '(' Expr ')'
ExprSequence ::= Expr ',' Expr | ExprSequence
',' Expr
```

Заглавными буквами в приведенном описании выделены типы лексем, подаваемых на вход синтаксического анализатора со стороны лексического анализатора: LITERAL – идентификатор, состоящий из цифр и букв латинского алфавита; FLOAT_VALUE – число с плавающей точкой в десятичной системе счисления; NUMBER – целое число в десятичной системе счисления.

Разработка лексического и синтаксического анализаторов на современном уровне развития программного обеспечения может быть выполнена путем их генерации [14]. В частности, для этой цели может быть использована связка таких генераторов, как GNU flex и GNU bison.

Семантические процедуры разрабатываются программистом вручную и в рассматриваемом случае реализуют работу с БД проекта и БД типовых элементов САПР ИИУ КП.

Результатом работы транслятора, предлагаемого ПОЯ, служит модель ИИУ КП, представленная совокупностью взаимосвязанных элементов БД проекта, выбранных из БД типовых элементов. Если все связи и параметры элементов установлены, то модель готова для проведения вычислительного эксперимента. Предполагается, что проверка данного обстоятельства осуществляется отдельной процедурой вне рамок ПОЯ описания структуры ИИУ КП обходом элементов БД проекта.

Следует отметить, что предлагаемый ПОЯ – текстовый, но может быть также использован в качестве базового слоя при реализации графического языка описания.

Разработка программного обеспечения.

Программные комплексы САПР относятся к числу наиболее сложных программных систем, создаваемых в промышленности. Трудоемкость создания таких комплексов оценивается десятками сотнями человеко-лет. В связи с этим одна из наиболее острых проблем создания САПР – это проблема ускорения и упрощения разработки программного обеспечения (ПО).

Основные способы решения данной проблемы на сегодня – это повторное использование кода (code reuse) [15], применение библиотечных модулей, разработка на базе так называемых фреймворков (расширяемых каркасов, диктующих правила построения архитектуры приложения).

В контексте разработки ПО специализированной САПР ИИУ КП в качестве фреймворка предлагается использовать ООСУБД.

На рис. 4 наглядно представлена предлагаемая архитектура ПО специализированной САПР ИИУ КП. В предлагаемой архитектуре ПО ключевая роль отводится ООСУБД общего назначения, ООСУБД проекта ИИУ КП и ООСУБД типовых элементов ИИУ КП. Первая из трех предоставляет базовые механизмы для описания и обработки хранимых объектов, реализуемых средствами ООЯП. Вторая и третья ООСУБД служат расширениями базовой ООСУБД для учета специфики объектной модели данных ИИУ КП и предоставляют прикладной программный интерфейс для взаимодействия с БД.

Архитектура предполагает наличие подключаемого набора программных модулей, реализующих модели типовых элементов ИИУ КП. Модели типовых элементов в данном случае должны быть реализованы в виде классов ООЯП, применяемого разработчиком САПР. Каждый из классов должен быть унаследован от некоторого базового класса, предоставляемого ООСУБД, в соответствии с назначением. Таким образом, исходная объектная модель, построенная на этапе первоначальной разработки САПР может быть при необходимости расширена.

Для обеспечения возможности управления форматом числовых данных и контроля ошибок округления в ходе вычислительных экспериментов в состав ПО САПР ИИУ КП вводится модуль процессора числовых данных, отвечающий подходу, описанному в [9].

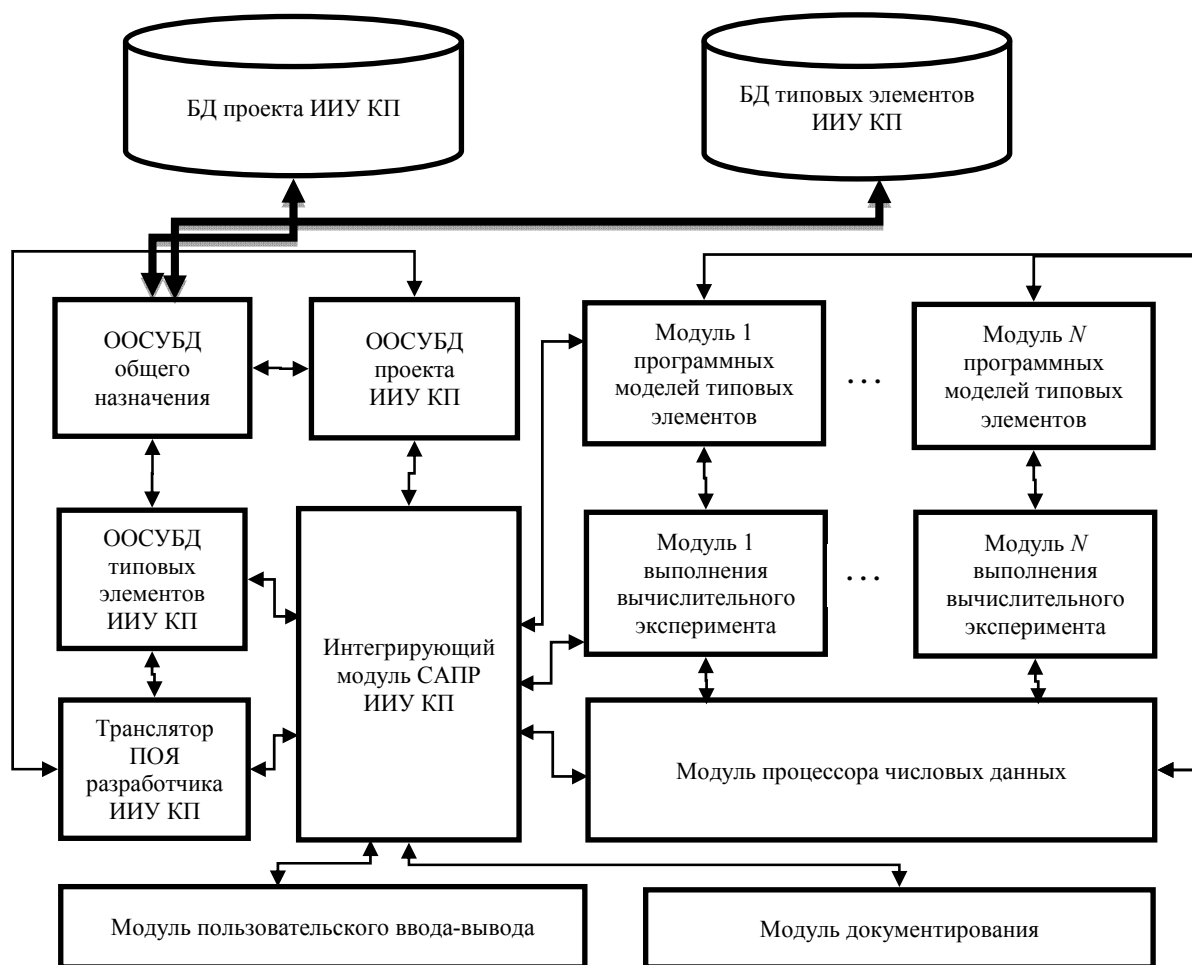


Рис. 4. Архитектура программного обеспечения
 Fig. 4. Software architecture

Учесть специфику проектной документации ИИУ КП призван модуль документирования, генерирующий требуемые документы по БД проекта в установленной форме.

Заключение. Рассмотрена актуальная задача по разработке специализированной САПР ИИУ КП, соответствующие подзадачи и предлагаемые авторами подходы к их решению.

Приведенное в статье дерево задач разработки специализированной САПР ИИУ КП систематизирует процесс разработки, определяет конечный перечень вопросов, подлежащих рассмотрению, упрощает анализ взаимосвязей компонентов САПР, служит основой для организации параллельной работы над отдельными компонентами в рамках команды разработчиков САПР.

Ряд вопросов, затрагиваемых в статье, требует отдельного освещения. К таким вопросам можно отнести, прежде всего, разработку математических моделей элементов ИИУ КП (в первую очередь ПИП), а также полной объектной модели с учетом типа вычислительного эксперимента.

Выполнение разработки специализированной САПР ИИУ КП на базе предложенных принципиальных решений (предлагаемого в настоящей статье ПОЯ и архитектуры ПО) представляется наиболее эффективным в условиях повышенных требований к срокам разработки ПО САПР и его адаптации к новым подходам в области математического моделирования ИИУ КП.

Список литературы

1. Прецизионный комплекс командных приборов инерциальной системы управления разгонным блоком «Бриз-М» на базе гироскопов с газостатическим подвесом / Ю. С. Александров, В. П. Арефьев, О. А. Артемьев, М. А. Виноградов, В. А. Зелинский,

В. М. Костырев, С. Г. Кучерков, А. М. Смирнов, А. В. Сорокин // Гироскопия и навигация. 2000. № 4. С. 5–10.

2. Болгов И. С., Дементьев Ю. Н. Прецизионный преобразователь с функцией формирования кода скорости вращения в совокупности с индукционным

датчиком угла // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 7, ч. 1. С. 9–13.

3. Гитис Э. И., Собкин Б. Л., Подколзин А. Н. Автоматизация проектирования аналого-цифровых устройств / под ред. Э. И. Гитиса. М.: Энергоатомиздат. 1987. 184 с.

4. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы: структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. М.: Энергоатомиздат. 1985. 439 с.

5. Метрологический анализ процессорных измерительных средств с помощью имитационного моделирования: алгоритмы и требования к программному обеспечению / Э. И. Цветков, Г. Н. Хуснутдинов, В. С. Соболев, М. И. Павлович, М. М. Лубочкин // *Измерения, контроль, автоматизация*. 1986. № 4. С. 46–54.

6. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений. 3-е изд. М.: ООО «И. Д. Вильямс». 2008. 720 с.

7. Цветков Э. И. Основы математической метрологии. СПб.: Политехника, 2005. 510 с.

8. Околнишников В. В. Представление времени в имитационном моделировании // *Вычислительные технологии*. 2005. Т. 10, № 5. С. 57–80.

9. Шамрай Я. Л. Форма представления погрешностей при проектировании вычислительной части интеллектуальных средств измерений // XXIV Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2021). СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С. 224–227.

10. Медников А. Ю., Соловьев А. Ю. Объектно-ориентированные базы данных – сегодня или завтра? // *Открытые системы*. 1994. № 4(8). С. 21–27.

11. Ramakrishnan R., Gehrke J. Database Management Systems. 3rd Ed. McGraw-Hill, 2002. 1104 p.

12. Эльдарханов А. М. Обзор моделей данных объектно-ориентированных СУБД // *Тр. Ин-та системного программирования РАН*. 2011. Т. 21. С. 205–226.

13. Осипов Д. Л. Технологии проектирования баз данных. М.: ДМК Пресс. 2019. 498 с.

14. Серебряков В. А. Теория и реализация языков программирования. М.: Физматлит. 2012. 236 с.

15. Sametinger J. Software engineering with reusable components. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997. 272 p.

Информация об авторах

Сольнищев Ремир Иосифович – д-р техн. наук, профессор кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: ssccte.leti@gmail.ru

Шамрай Яков Леонидович – инженер-программист ООО «ДизайнСофт», Заневский проспект, д. 30 к. 2, лит. А, Санкт-Петербург, 195112, Россия.
E-mail: yago1987@yandex.ru

Якимовский Дмитрий Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: yakimovsky@yandex.ru

Положенцев Дмитрий Сергеевич – ст. преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Россия.
E-mail: pds6476564@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1979-9302>

References

1. Precizionnoj kompleks komandnyh priborov inercial'noj sistemy upravlenija razgonnym blokom «Briz-M» na baze giropriborov s gazostaticeskim podvesom / Ju. S. Aleksandrov, V. P. Aref'ev, O. A. Artem'ev, M. A. Vinogradov, V. A. Zelinskij, V. M. Kostyrev, S. G. Kucherkov, A. M. Smirnov, A. V. Sorokin // *Girokopija i navigacija*. 2000. № 4. S. 5–10. (In Russ.).

2. Bolgov I. S., Dement'ev Ju. N. Precizionnyj preobrazovatel' s funkciej formirovanija koda skorosti vrashhenija v sovokupnosti s indukcionnym datchikom ugla // *Fundamental'nye issledovanija*. 2016. № 7. Ch. 1. S. 9–13. (In Russ.).

3. Gitis Je. I., Sobkin B. L., Podkolzin A. N. Avtomatizacija proektirovanija analogocifrovyh ustrojstv / pod red. Je. I. Gitisa. M.: Jenergoatomizdat. 1987. 184 s. (In Russ.).

4. Capenko M. P. Izmeritel'nye informacionnye sistemy: struktury i algoritmy, sistemotehničeskoe proektirovanie. M.: Jenergoatomizdat. 1985. 439 s. (In Russ.).

5. Metrologičeskij analiz processornyh izmeritel'nyh sredstv s pomoshh'ju imitacionnogo modelirovanija: algoritmy i trebovanija k programmnomu obespečeniju / Je. I. Cvetkov, G. N. Husnutdinov, V. S. Soboлев, M. I. Pavlovich, M. M. Lubochkin // *Izmerenija, kontrol', avtomatizacija*. 1986. № 4. S. 46–54. (In Russ.).

6. Buch G. Ob'ektno-orientirovannyj analiz i proektirovanie s primerami prilozhenij. 3-e izd. M.: ООО «И. Д. Вильямс». 2008. 720 s. (In Russ.).

7. Cvetkov Je. I. Osnovy matematičeskoj metrologii. SPb.: Politehnika, 2005. 510 s. (In Russ.).

8. Okol'nishnikov V. V. Predstavlenie vremeni v imitacionnom modelirovanii // *Vychislitel'nye tehnologii*. 2005. Т. 10, № 5. S. 57–80. (In Russ.).

9. Shamraj Ja. L. Forma predstavlenija pogreshnostej pri proektirovanii vychislitel'noj chasti intellektual'nyh sredstv izmerenij // XXIV Mezhdunar. konf. po mjagkim vychislenijam i izmerenijam (SCM-2021). SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LjeTI», 2021. S. 224–227. (In Russ.).

10. Mednikov A. Ju., Solov'ev A. Ju. Ob#ektno-orientirovannye bazy dannyh – segodnja ili zavtra? // Otkrytye sistemy. 1994. № 4(8). S. 21–27. (In Russ.).

11. Ramakrishnan R., Gehrke J. Database Management Systems. 3rd Ed. McGraw-Hill, 2002. 1104 p.

12. Jel'darhanov A. M. Obzor modelej dannyh ob#ektno-orientirovannyh SUBD // Tr. In-ta sistemnogo programirovanija RAN. 2011. T. 21. S. 205–226. (In Russ.).

13. Osipov D. L. Tehnologii proektirovanija baz dannyh. M.: DMK Press. 2019. 498 s. (In Russ.).

14. Serebrjakov V. A. Teorija i realizacija jazykov programirovanija. M.: Fizmatlit. 2012. 236 s. (In Russ.).

15. Sametinger J. Software engineering with reusable components. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997. 272 p.

Information about the authors

Remir I. Solnitsev – Dr Sci. (Eng.). Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: ssccte.leti@gmail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0415-6382>

Iakov L. Shamrai – Software engineer DesignSoft LLC, 30A, k. 2 Zanevsky prospect, Saint Petersburg, 195112, Russia.

E-mail: yago1987@yandex.ru

Dmitri O. Yakimovsky – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: yakimovsky@yandex.ru

Dmitri S. Polozhentsev – Senior Lecturer of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russia.

E-mail: pds6476564@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1979-9302>

Статья поступила в редакцию 11.10.2022; принята к публикации после рецензирования 28.10.2022; опубликована онлайн 25.12.2022.

Submitted 11.10.2022; accepted 28.10.2022; published online 25.12.2022.
