

На правах рукописи

Кондратьев Святослав Евгеньевич

**Методы и алгоритмы обеспечения непрерывной информационной
поддержки проектирования технических изделий в интегрированной
информационной среде предприятия**

Специальность 2.3.7.

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Госкорпорация «Росатом».

Научный руководитель: **Ульянин Олег Владимирович**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Гетманец Александр Никитович**
доктор технических наук, главный научный
сотрудник НИО-07, Федеральное
государственное унитарное предприятие
«Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики»

Петунин Александр Александрович
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры информационных технологий и
автоматизации проектирования Института
новых материалов и технологий, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова»
Российской академии наук

Защита диссертации состоится «03» октября 2024 г. в 13 час. 00 мин.
на заседании диссертационного совета 24.2.331.19 при МГТУ им. Н.Э.
Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, корп.1, зал
Учёного совета ГУК МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на сайте bmstu.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просьба
направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, корп.1, Учёному
секретарю диссертационного совета 24.2.331.19.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.331.19
кандидат технических наук, доцент



С.А. Сакулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На предприятиях приборостроительного профиля, занимающихся разработкой и изготовлением сложных наукоемких изделий, особо актуальна проблема управления разнородной информацией об изделии. Это обусловлено тем, что в современных условиях разработки и производства сложных наукоемких изделий, которые осуществляются, как правило, с применением методологии сквозного проектирования, на каждом этапе жизненного цикла изделия создается значительное количество информации об изделии (как правило, в своей специализированной системе), часть из которой передается на следующий этап. Для того, чтобы изделие было качественным, надежным и готовым к сроку сдачи, необходимо эффективно обрабатывать, контролировать и передавать эти данные между этапами жизненного цикла изделия.

На сроки и качество разработки любого нового изделия непосредственное влияние оказывают множество факторов, одними из которых являются процессы обработки и контроля данных о проектируемых технических изделиях. Эти процессы в современных условиях протекают в интегрированной информационной среде (ИИС), в состав которой входят такие корпоративные информационные системы (КИС) как система управления данными об изделии (PDM - Product Data Management) или система управления жизненным циклом изделий (PLM - Product Lifecycle Management) (как правило используемые совместно с системами автоматизированного проектирования (САПР)), система управления мастер-данными предприятия (MDM - Master Data Management), система управления ресурсами предприятия (ERP - Enterprise Resource Planning) и проч.

Электронная структура изделия (ЭСИ) является основным электронным конструкторским документом (ДЭ), содержащим описание изделия, иерархические отношения между его составными частями и другие данные в зависимости от его назначения. Одним из предназначений ЭСИ является организация информационного взаимодействия между PDM/PLM-системой и другими КИС.

В настоящее время существует проблема некорректного использования библиотечных элементов в ЭСИ (спецификациях). Проблема состоит в том, что конструкторы довольно часто ошибочно используют в ЭСИ запрещенные к применению (например, элементы, у которых изменилось фирменное обозначение) и/или недоступные для заказа (например, снятые с производства) покупные элементы. Подобное ведет к проблемам с закупками компонентов, запуском изделий в производство и значительным тратам времени на проведение изменений, что в свою очередь влияет на срок изготовления изделия в целом.

Вместе с тем имеет место проблема большого объема контроля, проводимого в отношении ДЭ. Это обусловлено тем, что в общем случае ДЭ имеет более сложную организацию и устройство, чем аналогичный по содержательной сложности документ, выполненный в бумажном виде. К

примеру, электронный чертеж содержит в себе не только сам файл, в котором содержится все визуальное существо аналогичного по сложности чертежа в бумажном виде, но и реквизитную часть в виде заполненных атрибутов, а также во многих случаях и связь с 3D-моделью, на основе которой этот чертеж был создан. Эти дополнительные сущности являются точками, в которых могут произойти ошибки. И если не проводить контроля таких сущностей, то в среднем существует вероятность увеличения сроков выпуска конструкторской документации (КД) из-за временных затрат на исправление возникших ошибок.

Электронная КД сама по себе более структурирована и формализована чем КД, выполненная в бумажной форме. Это обусловлено тем, что реквизитная и содержательная часть ДЭ хранится в определенном формализованном виде в базе данных (БД) PDM/PLM-системы в виде записей, объектов, связей между ними и проч., доступ к которым можно получить с помощью соответствующего API (Application Programming Interface – интерфейс программирования приложений) PDM/PLM-системы. В то время как реквизитная и содержательная часть бумажной КД не хранится нигде кроме как на соответствующем бумажном носителе этой КД. Для того, чтобы длительность согласования ДЭ не превышала, а в лучшем случае была меньше длительности согласования аналогичной по сложности бумажной КД, а также с целью сокращения числа ошибок в КД, необходимо использовать преимущества структурированного и формализованного вида хранения ДЭ по отношению к бумажной КД для реализации методов контроля и проверок ДЭ. Поэтому формирование эффективных методов контроля ДЭ является важной и актуальной задачей.

Вопросы управления данными об изделии и организации единого информационного пространства предприятия и электронного документооборота рассмотрены в работах Судова Е.В., Калянова Г.В., Кульги К.С., Филатова А.Н., Шиловичкого О.В., Абрамовой И.Г., Ed Miller, Maropoulos P.G., Dutta J., Сарафанова А.В., Норенкова И.П., Prashantha V.N., Донецкой Ю.В., Вичуговой А.А., Оглоблина Д.И., Рыжикова Р.Н., Голицыной Т.Д. и других ученых.

Однако в перечисленных работах и известных автору источниках подробным образом не исследованы вопросы применения библиотечных элементов в ДЭ и способы контроля ДЭ, отсутствуют описания эффективных методов синхронизации данных о библиотечных элементах и методов обработки текстового содержимого ДЭ.

Объектом исследования являются процессы обработки и контроля данных о проектируемых технических изделиях в интегрированной информационной среде предприятия.

Предметом исследования является задача повышения эффективности процессов обработки и контроля данных о проектируемых технических изделиях в интегрированной информационной среде предприятия.

Целью диссертационной работы является создание и обоснование методов и алгоритмов, направленных на повышение эффективности обработки

и контроля данных о проектируемых технических изделиях в интегрированной информационной среде предприятия.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе было необходимо решить следующие **задачи**:

- исследовать теоретические и методологические основы по обеспечению непрерывной информационной поддержки жизненного цикла проектируемых объектов;

- провести анализ факторов, влияющих на обработку и контроль данных о проектируемых объектах, с выявлением вынужденных временных затрат и классификацией встречающихся ошибок;

- разработать и обосновать алгоритм синхронизации данных о библиотечных элементах, хранящихся в базах данных MDM-системы и PDM/PLM-системы;

- разработать и обосновать алгоритмы контроля в PDM/PLM-системе правильности применения библиотечных элементов в электронной структуре изделия и полноты состава комплекта электронной конструкторской документации;

- разработать и обосновать метод обработки технических требований, содержащихся в электронных графических конструкторских документах, заключающийся в обнаружении, распознавании и контроле указанных в тексте обозначений нормативно-технических документов;

- разработать и обосновать алгоритм определения измененных в рамках доработки ДЭ при их электронном согласовании;

- разработать алгоритм передачи данных о библиотечных элементах в интегрированной информационной среде предприятия.

Научная новизна.

1) Предложен алгоритм синхронизации данных о библиотечных элементах, применяемых в электронной структуре изделия и 3D-моделях сборочных единиц, представляющий собой основу программного обеспечения для интеграции MDM-, PDM/PLM- и CAD-систем и отличающийся от известных применением специальной структуры хранения данных, основанной на хеш-таблицах, обеспечивающей уменьшение времени выполнения алгоритма.

2) Предложены алгоритмы контроля правильности применения библиотечных элементов в электронной структуре изделия и полноты состава комплекта документации проектируемых технических изделий, являющиеся основой соответствующего программного обеспечения в PDM/PLM-системе, отличающиеся от известных оптимизированным способом контроля составных частей электронной структуры изделия и позволяющие обнаруживать ошибки правильности применения библиотечных элементов и полноты состава комплекта документации.

3) Разработан метод обработки содержащихся в электронных двумерных конструкторских чертежах технических требований, заключающийся в обнаружении этих требований, распознавании текста из их области и контроле указанных в тексте обозначений нормативно-технической документации,

отличающийся от известных применением специального формализованного описания правил отображения таких требований на чертежах, и позволяющий обнаруживать ошибки правильности указания нормативно-технических документов.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что с использованием научных результатов, изложенных в работе, разработано и внедрено в промышленную эксплуатацию во ФГУП «ВНИИА» следующее программное обеспечение:

1) программа синхронизации данных о библиотечных элементах, хранящихся в базах данных MDM-системы и PDM/PLM-системы (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680214 от 08.12.2021 г.);

2) программа автоматической проверки в PDM/PLM-системе правильности применения библиотечных элементов в электронной структуре изделия (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669750 от 02.12.2021 г.);

3) программа автоматизированной проверки в PDM/PLM-системе полноты состава комплекта электронной конструкторской документации (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669749 от 02.12.2021 г.);

4) программа обработки технических требований, содержащихся в электронных двумерных конструкторских чертежах (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680485 от 10.12.2021 г.).

Соответствие паспорту научной специальности. Содержание работы соответствует паспорту научной специальности 2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки): п.3. «Разработка научных основ построения комплекса средств САПР, включающего информационное, математическое, лингвистическое, методическое, техническое, программное обеспечение непрерывной информационной поддержки жизненного цикла проектируемых объектов», п.7. «Разработка методов и компьютерных моделей обработки и формирования проектных решений, включая распознавание текстовой, графической информации с использованием современных средств технического обеспечения (3D–сканеров, 3D–принтеров, аддитивных технологий)».

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов обеспечиваются корректностью научно обоснованных методов исследования и статистической обработкой экспериментальных данных, а также сопоставлением полученных результатов с известными результатами других авторов и полноценным сравнением разных способов решения рассматриваемых задач.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII, IX, X, XI, XII, XIV научно-технических конференциях ученых ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова (2014-2018 гг., 2020 г.); XIV и XV международных конференциях «Системы проектирования,

технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2014, 2015), проходивших в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 16-й научно-технической конференции «Молодежь в науке» (г. Саров, 2017г.); XIII научно-технической конференции «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (г. Нижний Новгород, 2018г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 работ, из них 5 в изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов, рекомендуемых ВАК, и 4 статьи в сборниках международных и отраслевых конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из списка сокращений, введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 220 страниц машинописного текста, 53 рисунка, 12 таблиц. Список использованной литературы включает 142 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задачи по разработке новых методов и алгоритмов, направленных на повышение эффективности процессов передачи и контроля данных об изделии в ИИС предприятия. Сформулирована цель работы, а также задачи, подлежащие решению, приведены положения, выносимые на защиту, перечислены научная новизна и практическая значимость результатов работы, сведения о реализации основных положений диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению современных подходов по организации процессов контроля и обработки данных об изделии в ИИС предприятия.

ИИС представляет собой совокупность распределенных баз данных и информационных систем, содержащих сведения о продукции, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных тем субъектам производственно-хозяйственной деятельности, которые участвуют в осуществлении жизненного цикла продукции. С понятием ИИС тесно связан термин CALS или ИПИИ-технологий.

Особое внимание уделяется роли PDM/PLM-системы как основы построения на предприятии ИИС разработки изделий.

Для построения электронных библиотек PDM/PLM-системы необходимы исходные данные о покупных изделиях, материалах, стандартных изделиях и пр. Для хранения таких данных в большинстве случаев используется MDM-система – система управления основными данными (покупные изделия, оборудование, контрагенты, персонал и т.д.) организации. Такие данные содержат важнейшую для существования и развития организации информацию, при этом относительно редко меняются и не являются транзакционными.

Проведено исследование задач, которые необходимо решить для успешной интеграции систем класса PDM/PLM в ИИС. Одной из таких задач является передача данных о библиотечных элементах, которые используются в ДЭ,

между MDM-системой и PDM/PLM-системой. Другой важной задачей, которая недостаточно подробно описана в научной литературе, является автоматический контроль ДЭ и комплектов ДЭ.

Изучение литературы по вопросам передачи и контроля данных об изделии в интегрированной информационной среде предприятия в условиях интеграции функционирующих систем автоматизированного проектирования, MDM-системы и PDM/PLM-системы показало слабую научную проработку или отсутствие информации по таким вопросам, как:

- алгоритмы синхронизации данных о библиотечных элементах, созданных на основе данных MDM-системы и использующихся в электронных конструкторских документах в PDM/PLM-системе;

- методы и алгоритмы контроля электронных конструкторских документов на предмет правильности применения библиотечных элементов, полноты состава комплекта документации и правильности указания нормативно-технических документов в текстовых технических требованиях;

- методы и алгоритмы передачи данных об изделии между автоматизированными системами в интегрированной информационной среде предприятия.

Вторая глава посвящена созданию и обоснованию новых методов и алгоритмов контроля и обработки данных об изделии на этапе его разработки в ИИС предприятия.

Результатом разработки изделия является поставленный на учет в отделе технической документации (ОТД) комплект ДЭ. Поэтому далее по тексту под разработкой изделия понимается разработка комплекта ДЭ.

Разработку комплекта ДЭ условно можно разбить на три этапа:

- 1) формирование всех ДЭ, образующих полный комплект ДЭ;
- 2) согласование и утверждение ДЭ, входящих в комплект;
- 3) постановка таких ДЭ на учет в ОТД.

Рассмотрим подробнее эти этапы.

Этап формирования ДЭ был проанализирован на примере ВНИИА. На этом этапе в ЭСИ возникают ошибки, связанные с некорректным применением библиотечных элементов (табл. 1). Такие ошибки, в частности, обнаруживаются на этапе загрузки данных из ЭСИ в систему планирования ресурсов предприятия (ERP).

Причины таких ошибок следующие:

- отсутствие синхронизации данных между MDM-системой и электронными библиотеками PDM/PLM-системы – изменения, которые происходят с элементами в MDM-системе, не транслируются на соответствующие элементы в электронных библиотеках PLM-системы;

- отсутствие уведомления разработчиков ЭСИ о том, что применяемые в их ЭСИ библиотечные элементы изменились или содержащиеся в них данные устарели;

- отсутствие инструментария и лежащего в его основе алгоритма контроля ЭСИ на предмет правильности применения библиотечных элементов.

Для исключения ошибок, связанных с некорректным применением библиотечных элементов, необходимо разработать эффективный алгоритм синхронизации данных о библиотечных элементах с обеспечением уведомлений разработчиков о произошедших изменениях. Неизменяемыми условиями для задачи являются характеристики аппаратного обеспечения сервера приложения PDM/PLM-системы и число записей и объектов в базах данных MDM- и PLM-системы. Основные параметры, которые влияют на длительность выполнения алгоритма:

- число операций с библиотечными элементами (p);
- промежуточная структура хранения данных (S).

Таблица 1. Классификация ошибок в ЭСИ касательно применения библиотечных элементов

Вид ошибки	Время, которое необходимо затратить на исправление ошибки		
	Этап формирования ДЭ	Этап согласования и утверждения ДЭ	Этап постановки на учет в ОТД ДЭ
Применение библиотечного элемента, на который наложено ограничение применимости	От 5 мин до одного рабочего дня	От 5 мин до одного рабочего дня	От нескольких часов до одного рабочего дня
Применение библиотечного элемента, который отсутствует в базе данных покупных изделий	От 5 мин до одного рабочего дня	От 5 мин до одного рабочего дня	От нескольких часов до одного рабочего дня
Применение библиотечного элемента, у которого неправильно записано наименование	От 5 до 20 мин	От 5 до 20 мин	От 5 мин до нескольких часов

С целью разработки эффективного алгоритма синхронизации было рассмотрено несколько вариантов его реализаций. В одном из вариантов реализации алгоритма для обеспечения необходимого уровня доступа к элементам за счет применения механизма перевода состояния жизненного цикла элементов удалось снизить число операций с элементами на 178 единиц по сравнению с механизмом перемещения элементов между общедоступными и недоступными для пользователей библиотеками.

На следующем этапе следует определить эффективную промежуточную структуру хранения данных, применение которой приводило бы к уменьшению времени обработки данных. Эта структура хранения данных содержит информацию о проведенных изменениях с библиотечными элементами с учетом их применимости в конкретных ЭСИ, разработанных определенными разработчиками/конструкторами.

При обработке алгоритмом событий изменений библиотечных элементов будут осуществляться только операции поиска и добавления необходимых данных в промежуточную структуру хранения S . При текущей постановке задачи оптимальным является выполнение этих процедур за фиксированное

минимальное время. Для теоретического анализа алгоритмов целесообразно использовать обозначение асимптотической сложности алгоритма «O» большое – зависимость максимального числа элементарных операций, выполненных алгоритмом, от размера входных данных.

Если обратиться к таблице зависимостей временной сложности алгоритмов от структур данных, то для описанной выше задачи наилучшим образом подходит структура хеш-таблицы (*HashTable*). Хеш-таблица представляет собой набор пар <ключ>:<значение>, где поиск по ключу и добавление данных осуществляются в среднем за фиксированное время $O(1)$.

Согласно Кормену Т. существуют две основных реализации хеш-таблиц для разрешения коллизий: на основе открытой адресации и на основе метода цепочек.

При решении данной задачи следует применять хеш-таблицы, построенные на основе метода цепочек, т.к. их целесообразно использовать, когда заранее неизвестно число хранимых элементов (т.е. изменений о библиотечных элементах), либо их может быть достаточно много. Добавление элемента в применяемый в методе цепочек связанный список в случае возникновения коллизии всегда происходит за фиксированное время, т.к. оно осуществляется в начало связанного списка. А при использовании открытой адресации возможна кластеризация, т.е. образование занятых смежных ячеек, при этом если ячейки будут заполнены – нужно проводить перехэширование и перестраивать всю таблицу.

Экспериментальные запуски нескольких реализаций алгоритма подтвердили теоретические предположения: минимальное время показал алгоритм, в котором на 178 единиц был сокращен параметр p и который основан на структуре данных, представленной на Рис. 1.

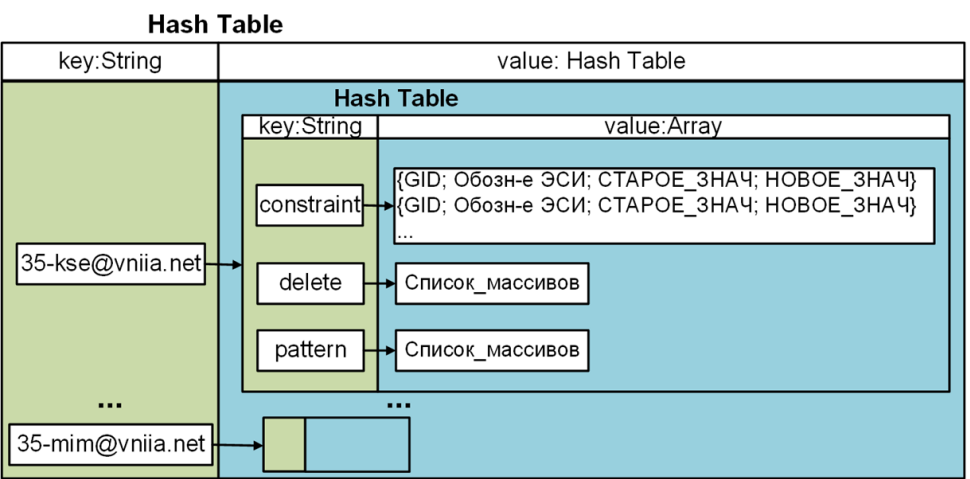


Рис. 1. Промежуточная структура хранения данных об измененных библиотечных элементах

Алгоритм синхронизации данных о библиотечных элементах представлен на Рис. 2.

На этапе формирования ДЭ в PLM-системе разработчики и конструкторы применяют библиотечные

элементы, которые отражают информацию о покупных изделиях и материалах. Для создания таких элементов используются специальные процессы workflow, в рамках которых данные о библиотечных элементах согласуются специалистами по нормативно-справочной информации (НСИ), которые изначально создают эти данные в MDM-системе.

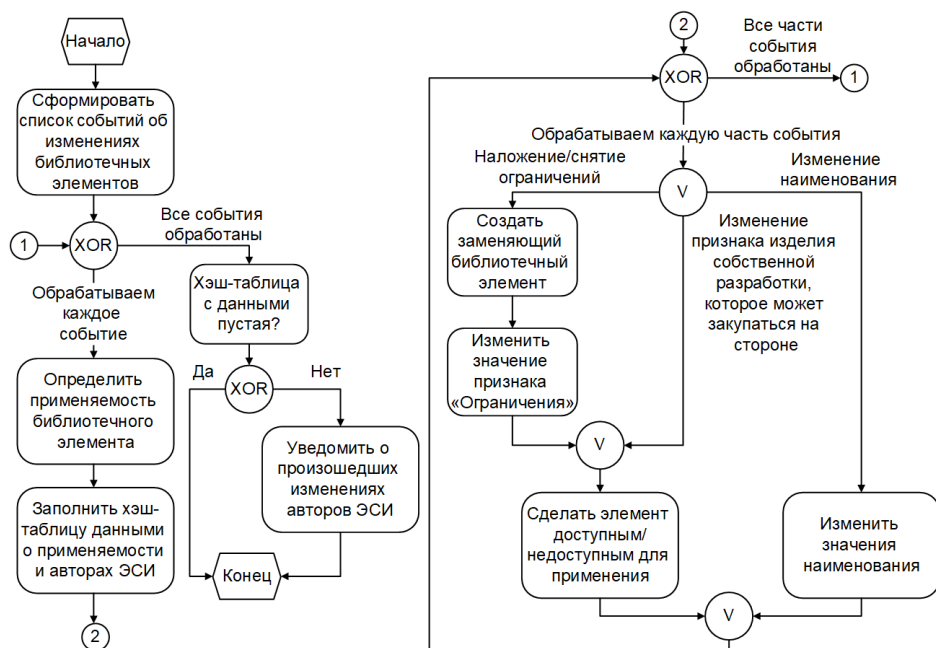


Рис. 2. Алгоритм синхронизации данных о библиотечных элементах

синей пунктирной линией показано медианное значение, черной пунктирной линией - среднее арифметическое значение, зеленой гистограммой показана нормализованная частота попадания величины в заданный интервал (ширина интервала 39 мин), красной линией показана теоретическая функция плотности распределения вероятности Вейбулла с параметром формы $k = 0,5$.

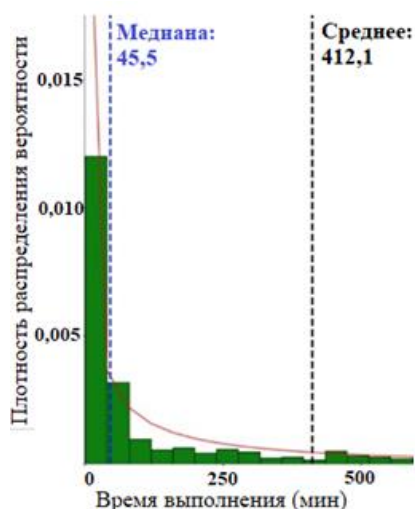


Рис. 3. Распределение среднего времени выполнения заданий в процессах создания библиотечных элементов

комментарии к таким текстовым требованиям и надписям, как технические требования (ТТ). Основная часть комментариев для доработки относится к актуальности и правильности указания нормативно-технической документации (НТД), способу обработки поверхностей и использованию материалов, грамматическим ошибкам.

На примере ВНИИА было проанализировано среднее время выполнения заданий специалистами по НСИ в 1722 процессах создания библиотечных элементов, данные о которых уже существовали в MDM-системе на момент запуска процессов. На графике (Рис. 3) вертикальной

С учетом вышесказанного для повышения эффективности передачи данных о библиотечных элементах был разработан алгоритм, применение которого в случае отсутствия ошибок и недопустимых ограничений применимости позволяет создавать библиотечные элементы без привлечения специалистов по НСИ и сократить длительность этапа разработки ДЭ в среднем на 45 минут.

На передачу данных об изделии также непосредственное влияние оказывает качество разработки и длительность контроля связанных с ЭСИ ДЭ, и в частности, двумерных чертежей. Приблизительно 5% от всего объема комментариев для доработки согласующих лиц к электронным двумерным чертежам составляют

Технические требования на 2D-чертеже с точки зрения объектов на изображении обладают следующими свойствами:

- ТТ представляют собой набор расположенных рядом слов, т.е. каждое слово имеет как минимум одно близкое по расположению слово. Если представить множество точек P , принадлежащих четырем взаимно перпендикулярным линиям, исходящих из центра контура слова и зависящих от ширины и высоты контура слова, то существует хотя бы одна точка p из этого множества, которая принадлежит хотя бы одному контуру какого-либо слова c из множества всех контуров слов ТТ C : $\exists p, p \in P, \exists c, c \in C, \rightarrow p \in c$;

- ТТ являются самым большим с точки зрения числа слов текстовым блоком, т.е. если T – множество всех текстовых блоков 2D-чертежа (i – порядковый номер блока): $T = \{t_i, \dots, t_n\}$. Если q_i – число слов в текстовом блоке t_i , то определяем q_{\max} – максимальное число слов в блоках: $\forall q \in N: (q \geq q_{\max} \Rightarrow q = q_{\max})$, здесь N – множество натуральных чисел. То есть $TT = \{t \in T \mid q_{\max}\}$;

- ТТ никогда не бывают окружены рамкой или помещены в таблицу, не содержат каких бы то ни было объектов в обрамляемой ТТ прямоугольной области. Если представить прямоугольную область, содержащую ТТ, как $Rect_{TT}[\{x_{l_{TT}}, y_{l_{TT}}\} \{x_{2_{TT}}, y_{2_{TT}}\}]$, здесь $\{x_{l_{TT}}, y_{l_{TT}}\}$ – координата левого верхнего угла прямоугольной области, $\{x_{2_{TT}}, y_{2_{TT}}\}$ – координата правого нижнего угла прямоугольной области. Обрамляемую прямоугольную область можно представить, как $Rect_{oo}[\{x_{l_{oo}}, y_{l_{oo}}\} \{x_{2_{oo}}, y_{2_{oo}}\}]$, здесь $\{x_{l_{oo}}, y_{l_{oo}}\}$ – координата левого верхнего угла обрамляемой прямоугольной области, $\{x_{2_{oo}}, y_{2_{oo}}\}$ – координата правого нижнего угла обрамляемой прямоугольной области. При этом ширину области слева и справа от ТТ можно принять приблизительно равной двум средним высотам слов в ТТ: $w \approx 2 \times h_w = x_{l_{TT}} - x_{l_{oo}} = x_{2_{oo}} - x_{2_{TT}}$, здесь h_w – средняя высота слов в ТТ. Таким образом, область, ограниченная обрамляемой и границами ТТ, не содержит никаких объектов: $Rect_{oo}[\{x_{l_{oo}}, y_{l_{oo}}\} \{x_{2_{oo}}, y_{2_{oo}}\}] - Rect_{TT}[\{x_{l_{TT}}, y_{l_{TT}}\} \{x_{2_{TT}}, y_{2_{TT}}\}] = \emptyset$.

На основе данного формального описания был разработан метод обработки технических требований, который представлен в виде следующего кортежа:

$$VM_{TT} = \langle DM, RM, AM \rangle.$$

Здесь DM – множество способов для детектирования (выделения) ТТ на чертежах; RM – множество способов для распознавания ТТ; AM – множество способов для анализа распознанных (выделенных) ТТ.

Данный метод целесообразно применять в организациях, в которых используются разнородные САПР и которые имеют большой задел выпущенных 2D-чертежей, на переработку которого потребуется затратить значительные людские и временные ресурсы. В остальных случаях рационально использовать упрощенную обработку (без детектирования и распознавания) текстового содержимого из области ТТ на 2D-чертежах, разработанных с применением шаблонов чертежей, в которых область с ТТ

однозначно определена, а само текстовое содержимое ТТ может быть обработано в изначально введенном виде.

В научной литературе недостаточно описаны методы и средства, направленные на контроль ЭСИ, в частности, не рассмотрен вопрос эффективного контроля и обхода ЭСИ для контроля правильности применения библиотечных элементов. Относящиеся к применению библиотечных элементов требования указываются в НТД (например, ГОСТ 2.106, ГОСТ 2.109, ГОСТ 2.053, ГОСТ 2.055, стандарты отрасли и проч.). Эти требования касаются необходимости реализации подборных позиций, взаимозамен и заготовок. В связи с тем, что ЭСИ представляет собой связный ациклический направленный невзвешенный граф, то данные о подборных позициях, взаимозаменах и заготовках также следует реализовывать в виде подграфа такого вида. Таким образом, с учетом данных реализаций в отношении контроля правильности применения библиотечных элементов необходимо проверять не только первый уровень вхождений в ЭСИ, но и второй.

Существуют следующие элементарные алгоритмы обхода дерева или графа:

- поиск в ширину (breadth-first search);
- поиск в глубину (depth-first search).

В рамках поиска в глубину доступны для использования прямой (pre-order), центрированный (in-order) и обратный (post-order) способы обхода графа. При реализации алгоритма существует ограничение: начать контроль ЭСИ (графа) возможно только с корневого узла, т.к. на момент начала контроля доступно только обозначение ЭСИ или обозначение корневого узла (составной части). В таком случае для текущей задачи контроля ЭСИ можно использовать либо прямой обход в рамках поиска в глубину, либо поиск в ширину.

Критерием определения эффективности отработки алгоритма является число элементарных операций, выполняемых алгоритмом, при осуществлении обхода ЭСИ. При осуществлении поиска в ширину после контроля всех узлов на первом уровне вхождений будут осуществляться лишние операции (по сравнению с поиском в глубину) на переход к тем узлам, которые уже были проверены, для перехода на второй уровень вхождений:

$$N_{BREADTH} = N_{DEPTH} + (k_1 - 1).$$

Здесь $N_{BREADTH}$ – число операций при осуществлении поиска в ширину; N_{DEPTH} – число операций при осуществлении поиска в глубину; k_1 – число узлов на первом уровне вхождений.

С учетом двух возможных вариантов реализации алгоритма контроля ЭСИ (Рис. 4) можно сделать вывод об оптимальности использования алгоритма поиска в глубину, т.к. он осуществляется за меньшее число операций, т.е. за меньшее время, нежели алгоритм поиска в ширину.

Анализ этапа постановки документации на учет в ОТД показал значительное число ошибок, связанных с некомплектностью ДЭ. Первичная постановка ДЭ на изделие осуществляется комплектно, т.е. на учет единовременно должен быть поставлен весь набор ДЭ, необходимых для

изготовления изделия (или отправки ДЭ на предприятие-изготовитель). В случае, если на этапе постановки на учет по каким-то причинам не обработают какой-либо ДЭ из комплекта на изделие, то в дальнейшем не получится расцеховать этот ДЭ, в итоге это может привести к тому, что нужную деталь вовремя не изготовят, что негативным образом скажется на планировании и сроках изготовления изделия.

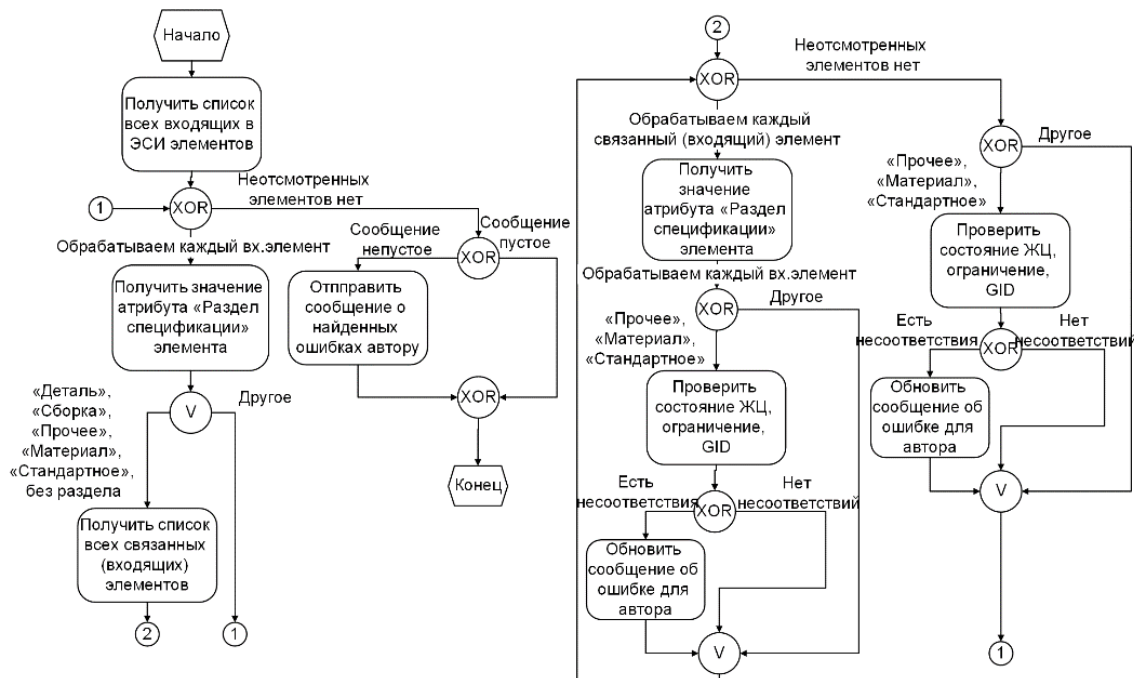


Рис. 4. Алгоритм контроля ЭСИ

Основным этапом процедуры контроля полноты состава комплекта ДЭ является формирование множеств отсутствующих и лишних ДЭ в комплекте. Задача формирования множеств может быть решена несколькими способами.

Во-первых, контроль узлов можно осуществлять на этапе обхода всех узлов графа, либо осуществить перебор всех узлов графа для получения, например, списка узлов. И только после этого, осуществляя перебор каждого узла из списка, произвести контроль каждого узла на наличие связанных ДЭ.

Во-вторых, перебор всех узлов графа можно произвести, используя элементарные алгоритмы поиска в ширину (breadth-first search) и поиска в глубину (depth-first search).

Следовательно, существуют четыре способа формирования списков отсутствующих и лишних ДЭ в комплекте:

- 1) контроль узлов на этапе обхода графа с применением поиска в ширину;
- 2) контроль узлов на этапе обхода графа с применением поиска в глубину;
- 3) контроль узлов после этапа обхода графа с применением поиска в ширину;
- 4) контроль узлов после этапа обхода графа с применением поиска в глубину.

В случае осуществления контроля узлов после обхода графа будут тратиться лишние операции на перемещение по созданному списку узлов, входящих в граф. При этом не будет выполнено требование о не более чем разовом посещении каждого узла. Например, если в графе n узлов, то

потребуется потратить n лишних операций на перебор всех узлов из списка для их контроля. Таким образом, можно сделать вывод, что контроль узлов на этапе обхода графа является более целесообразным с точки зрения минимизации числа операций с узлами графа.

В случае осуществления поиска в ширину отсутствует возможность одновременно применить контроль узла на наличие связанных ДЭ и на наличие входящих узлов. И даже если будут обнаружены входящие узлы – переход «вглубь» будет осуществлен только после перебора всех узлов на исходном уровне. При таком раскладе будут затрачиваться лишние операции на возврат к узлам, у которых при первом проходе проверялось наличие связанных ДЭ, а при втором проходе – наличие входящих узлов. Например, пусть существует K уровней входимости во все узлы графа. Вначале на каждом уровне последовательно проверяется каждый узел на наличие связанных ДЭ, затем при контроле на наличие структуры придется затратить $k_i - 1$ операций на переходы обратно к этим узлам:

$$N_{BREADTH} = N_{DEPTH} + \sum_{i=1}^K (k_i - 1).$$

Здесь $N_{BREADTH}$ – число операций при осуществлении поиска в ширину; N_{DEPTH} – число операций при осуществлении поиска в глубину; K – число уровней входимости; k_i – число узлов на i -м уровне вхождений.

Таким образом, определен оптимальный алгоритм контроля полноты состава комплекта ДЭ (Рис. 5), который основан на контроле узлов на этапе обхода графа с применением поиска в глубину.

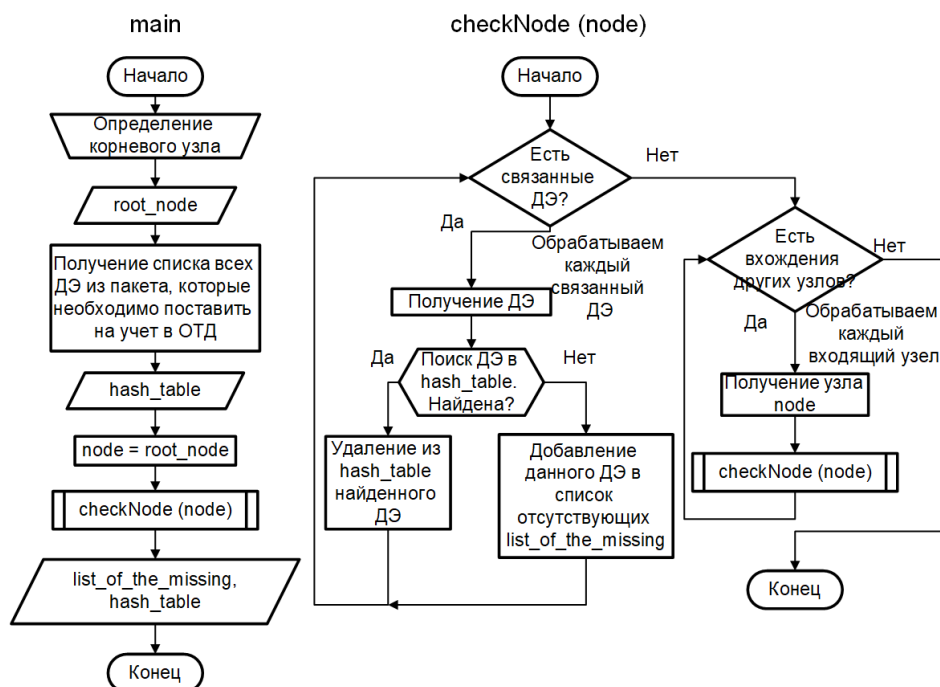


Рис. 5. Алгоритм контроля полноты состава комплекта электронной конструкторской документации

Третья глава

посвящена описанию реализаций методов и алгоритмов обработки и контроля данных о проектируемых объектах.

Во ВНИИА создана и успешно развивается корпоративная ИИС проектирования, технологической подготовки и производства изделий,

интегрирующая в себе информацию об изделиях и связанных с ними процессах жизненного цикла, получаемую из разнородных КИС.

Основой этой ИИС является автоматизированная система управления дискретным производством «Призма», которая используется для управления производством изделий, научными и опытно-конструкторскими разработками, а также хозяйственной деятельностью и материальным обеспечением всех этих видов деятельности. На этапе разработки изделий применяется находящаяся в промышленной эксплуатации PLM-система *Windchill* (разработчик - компания PTC, США), в которой непосредственно создаются, утверждаются, хранятся и изменяются подлинники ДЭ, таких как ЭСИ, 3D-модели сборочных единиц и деталей, электронные чертежи и др.

Алгоритм синхронизации данных о библиотечных элементах между MDM-системой (модуль «Призмы» - справочник продукции внешней поставки) и PLM-системой реализован в виде *Java*-программы, развернутой на стороне сервера приложения PLM-системы и обеспечивающей обмен данными посредством распределенной системы обмена сообщениями *Apache Kafka*. На основе алгоритма передачи данных о библиотечных элементах разработана *Java*-программа, которая вызывается посредством робота в рамках электронного процесса workflow «запрос на создание библиотечных элементов».

Метод обработки текстовых технических требований на двумерных электронных конструкторских чертежах реализован в виде *Java*-программы (с применением библиотек OpenCV (Open Source Computer Vision Library) и Tesseract OCR (Optical Character Recognition)), которая выполняет следующие функции:

- 1) обнаружение области на чертеже, содержащей технические требования;
- 2) распознавание текста из области, определенной в п.1);
- 3) запись распознанного текста в базу данных;
- 4) применение регулярных выражений к тексту технических требований для поиска обозначений НТД;
- 5) формирование запросов по каждому обнаруженному обозначению НТД к корпоративным системам, содержащим информацию об актуальности НТД;
- 6) принятие решения о правильности указания обозначений НТД. В случае неправильного указания чертеж автоматически возвращается на доработку конструктору в рамках электронного согласования workflow.

Алгоритм контроля правильности применения библиотечных элементов в ЭСИ был воплощен в виде *Java*-программы, которая вызывается автоматически из роботов workflow в рамках электронных процессов согласования и проведения изменений – в начале процессов, а также после всех доработок от согласующих, т.е. на всех этапах, когда у разработчика есть возможность провести изменения.

Контроль полноты состава комплекта ДЭ осуществляется на этапе первичной постановки ДЭ на учет в ОТД с помощью *Java*-программы, результат выполнения которой отражается в виде визуального отчета, содержащего две таблицы: «отсутствуют» и «лишние», в которых содержатся данные об обозначениях и наименованиях ДЭ, а также о наличии у этих ДЭ признака учета.

Разработка и внедрение описанных выше программ во многом обеспечили переход от использования бумажных подлинников КД к электронным во ВНИИА, а также позволили сократить число ошибок в ДЭ и длительность контроля, согласования и обработки ДЭ.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, полученные на основе проведённых в диссертационной работе исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Предложен эффективный алгоритм синхронизации данных о применяемых в электронной структуре изделия и 3D-моделях сборочных единиц библиотечных элементах, данные о которых хранятся в базах данных MDM-системы и электронных библиотеках PDM/PLM-системы, отличающийся от известных использованием специальной структуры хранения данных, основанной на хеш-таблицах, обеспечивающей уменьшение времени выполнения алгоритма при поиске и вставке данных в эту структуру. На базе предложенного алгоритма создана «Программа синхронизации данных о библиотечных элементах, хранящихся в базах данных MDM-системы и PDM/PLM-системы» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680214 от 08.12.2021 г.).

2) Предложены алгоритмы контроля в PDM/PLM-системе правильности применения библиотечных элементов в электронной структуре изделия на этапе ее электронного согласования и полноты состава комплекта электронной конструкторской документации на этапе его постановки на учет в отделе технической документации, отличающиеся от известных оптимизированным способом контроля составных частей электронной структуры изделия и позволяющие обнаружить ошибки, связанные с неправильным применением библиотечных элементов и с неполнотой предъявляемого комплекта документации. Основываясь на принципах формирования электронных структур изделий и спецификаций на их основе выбран и обоснован эффективный способ контроля составных частей электронной структуры изделия – поиск в глубину (depth-first search) с применением прямого обхода. На базе предложенных алгоритмов созданы:

- «Программа автоматической проверки в PDM/PLM-системе правильности применения библиотечных элементов в электронной структуре изделия» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669750 от 02.12.2021 г.);

- «Программа автоматизированной проверки в PDM/PLM-системе полноты состава комплекта электронной конструкторской документации» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669749 от 02.12.2021 г.).

3) Все программы внедрены в промышленную эксплуатацию на всём объёме утверждённой документации на изделия на всех производственных площадках ВНИИА. Эксплуатация программ в течение нескольких лет подтвердила их эффективность.

4) Разработан метод обработки содержащихся в электронных двумерных конструкторских чертежах технических требований, который заключается в обнаружении этих требований, распознавании текста из их области и контроле указанных в тексте обозначений нормативно-технических документов, отличающийся от известных применением специального формализованного описания правил отображения таких требований на чертежах, и позволяющий обнаруживать отклонения от правильного указания нормативно-технических документов и тем самым обеспечивающий исключение таких ошибок (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680485 от 10.12.2021 г.).

5) Внедрение разработанных алгоритмов и метода обеспечило:

- сокращение числа ошибок, связанных с неправильным применением библиотечных элементов в электронных структурах изделий (спецификациях) на 70%;

- уменьшение времени выполнения синхронизации данных о библиотечных элементах, хранящихся в базах данных MDM-системы и PDM/PLM-системы;

- сокращение числа ошибок, связанных с неполнотой комплекта электронных конструкторских документов;

- сокращение в более чем 10 раз длительности контроля полноты состава комплекта;

- контроль правильности указания нормативно-технических документов в технических требованиях конструкторских чертежей.

6) Предложены рекомендации по организации процессов контроля и обработки данных о проектируемых объектах в рамках построения в организации интегрированной информационной среды проектирования изделий.

Применение разработанных рекомендаций позволяет существенно сократить трудоёмкость проектирования изделий за счёт использования в электронной структуре изделия проверенной информации о библиотечных элементах и сокращения времени согласования и утверждения технических документов, а также исключить ошибки, связанные с неправильным указанием нормативно-технических документов в графических конструкторских документах. Данные рекомендации имеют особую актуальность на этапе внедрения PDM/PLM-системы на предприятиях, аналогичных ВНИИА, и применимы к любой импортной или отечественной PDM/PLM-системе вне зависимости от её производителя.

По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 5 в российских рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, и 4 статьи в сборниках материалов конференций.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В., Кожевников Н.О. Функциональные возможности PLM-системы в процессе разработки изделий // Известия

Кабардино-Балкарского государственного университета. 2013. Т. 3, №6. С. 40-43 (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В., Абакумов Е.М. Проблемные вопросы организации электронного документооборота КД, разработанной в САПР, в условиях перехода от использования бумажных подлинников КД к электронным // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2014): труды международной конференции. М., 2014. С. 197-201 (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).

3. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В., Кожевников Н.О. Автоматизация процессов управления конструктивной электронной структурой изделия // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. №3 (47). С. 143-146 (0,3 п.л. / 0,3 п.л.).

4. Методология создания интегрированной информационной системы управления инженерными данными в условиях совместного использования конструкторской документации в бумажной и электронной формах / Е.М. Абакумов, Н.О. Кожевников, О.В. Ульянин, С.Е. Кондратьев [и др.] // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. №3 (159). С. 47-55 (0,6 п.л. / 0,1 п.л.).

5. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В., Абакумов Е.М. Совершенствование процессов обмена данными между PLM-системой и корпоративной информационно-управляющей системой в интегрированной информационной среде // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2015): труды международной конференции. М., 2015. С. 294-298 (0,3 п.л. / 0,3 п.л.).

6. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В., Абакумов Е.М. Методы перевода конструкторской документации из бумажного вида в электронный при формировании электронного архива технической документации в корпоративной информационно-управляющей системе // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015: материалы восьмой международной конференции: в двух томах. М., 2015. Т. 2. С. 243-245 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В. Разработка методов и алгоритмов синхронизации данных для разработки изделия в интегрированной информационной среде предприятия // Молодежь в науке: сборник докладов 16-й научно-технической конференции. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Т. 2. 2018. 308 с. ISBN 978-5-9515-0403-6 (0,5 п.л. / 0,5 п.л.).

8. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В., Абакумов Е.М. Применение методов компьютерного зрения и машинного обучения для распознавания технических требований на 2D-чертежах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. №2 (182). С. 35-43 (0,6 п.л. / 0,6 п.л.).

9. Кондратьев С.Е., Ульянин О.В., Абакумов Е.М. Алгоритмы синхронизации и контроля данных, применяемых в электронной структуре изделия // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2024. №1 (193). С. 58-68 (0,7 п.л. / 0,6 п.л.).