

УДК 658.7:004

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-56-63

Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики

Е. С. Кузнецова, НИИ «Субмикрон», Москва, Россия

Д. К. Щеглов, кандидат технических наук, доцент, Северо-Западный региональный центр концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена разработке адаптивной системы управления запасами для элементов замены сложных технических систем на стадии эксплуатации. Цель исследования – разработка модели управления запасами элементов замены, способствующей повышению надежности и снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт средств производства. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и экономической эффективности обслуживания средств и объектов производства в условиях растущих требований к их бесперебойной работе. Научная новизна заключается в синтезе трехуровневой архитектуры, интегрирующей цифровые двойники изделий, предиктивную аналитику и гибридные модели машинного обучения для динамического расчета оптимального уровня запасов. Ключевым отличием предлагаемой методики является реализация динамического резервирования на основе оценки рисков срыва поставок и прогнозирования отказов с точностью до 81 % с использованием алгоритма *Apriori* для идентификации состава ремонтных комплектов. Предложенное решение позволяет перейти от реактивной к предиктивной модели управления. Практическая апробация демонстрирует значительное улучшение ключевых показателей, а именно: снижение среднего уровня запасов на 25 %, сокращение времени реакции на сбой в 4 раза (до 12 часов), уменьшение простоев из-за дефицита на 87 % при обеспечении коэффициента готовности $K_g \geq 0,98$. Внедрение адаптивной системы управления запасами создает основу для повышения конкурентоспособности высокотехнологичных предприятий за счет оптимизации ресурсного цикла и минимизации рисков остановки производства.

Ключевые слова: адаптивное управление запасами, цифровой двойник, предиктивная аналитика, жизненный цикл изделия, сложные технические системы, динамическое резервирование.

Введение

Организация хозяйственной деятельности (производства) представляет собой процесс рационального соединения в пространстве и времени *средств производства и трудовых ресурсов* с целью создания *объектов производства* в необходимом количестве, требуемого качества при наиболее рациональном использовании имеющихся ресурсов [1].

К средствам производства относится совокупность *предметов труда* (материалы, комплектующие и др.) и *средств (орудий) труда* (машины, оборудование, инструменты, технологическая оснастка и др.). *Объектами производства* выступают создаваемые в процессе производства продукты: изделия, товары (будущие предметы труда), услуги и др. В зависимости от особенностей хозяйственной деятельности предприятие может выпускать как конечные объекты производства, так и средства производства для собственных потребностей [2].

Поддержание в работоспособном состоянии имеющихся на предприятии средств производства, выполнение гарантийных и постгарантийных обязательств по поставляемым объектам производства требует проведения их своевременного технического обслуживания и ремонта, а также модернизации [3]. Необходимость обеспечения быстрой замены отказавших узлов и агрегатов требует от предприятия создания системы управления запасами элементов замены для находящихся в эксплуатации объектов и средств производства [4].

Поддержание в работоспособном состоянии имеющихся на предприятии средств производства, а также выполнение гарантийных и постгарантийных обязательств по поставленным заказчикам объектам производства требуют организации своевременного технического обслуживания, проведения ремонтов, в ряде случаев – модернизации [5]. Необходимость обеспечения оперативной замены вышедших из строя узлов и агрегатов, как в составе собственных производственных мощностей, так и в поставленной заказчикам продукции, обуславливает потребность в создании системы управления запасами элементов замены для находящихся в эксплуатации объектов и средства производства.

В условиях возрастающей сложности технических систем, а также усиления требований к их эксплуатационной надежности и экономической эффективности особую актуальность приобретает разработка и внедрение *адаптивных систем управления запасами* (АСУЗ), основанных на использовании потенциала цифровых двойников и методов предиктивной аналитики [6].

Цель статьи – разработка модели управления запасами элементов замены, способствующей повышению надежности и снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт средств производства.

Интегрированная система управления запасами в контексте жизненных циклов средств и объектов производства

На рисунке 1 представлена концептуальная схема АСУЗ промышленного предприятия.

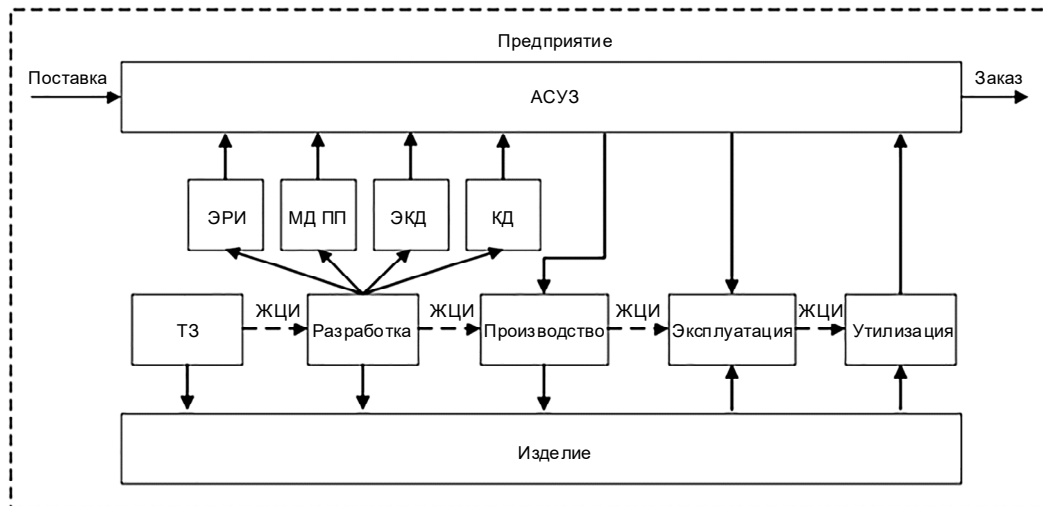


Рис. 1. Схема взаимодействия между этапами жизненного цикла изделия и управлением запасами

Fig. 1. Diagram of interaction between lifecycle stages and inventory management

Как видно из рисунка 1, процесс разработки изделия делится на четыре последовательных этапа:

- 1) разработка электрических схем – этап электро-радиоизделий;
- 2) разработка конструкции – этап механических деталей и печатных плат;
- 3) оформление конструкторской документации для производства – этап эскизной конструкторской документации;
- 4) финальное оформление конструкторской документации.

Благодаря инерционности процесса запросы в АСУЗ поступают своевременно, и обеспечивается наибольшая адаптивность в потребностях. Производственно-эксплуатационная деятельность предприятия обладает двойственной природой, обусловленной параллельным управлением жизненными циклами изделий (ЖЦИ), что формирует комплекс специфических требований к процессам снабжения и логистики запасных частей, а также организации технического обслуживания и ремонта [7].

Предприятие может выполнять функции разработчика и производителя средств производства, отдельных видов технологического оборудования, предназначенного для собственного применения. Такая организационная модель формирует замкнутый внутренний контур спроса и предложения на компоненты ремонтной инфраструктуры, включая проектирование, производство, эксплуатацию и послепродажное сопровождение оборудования.

В отличие от средств производства и объектов производства готовая продукция после завершения изготовления передается внешним заказчикам, что сопровождается сохранением полной информации о составе, используемых материалах, параметрах контроля качества и другой информацией, интегрированной с цифровым двойником.

Производственно-сервисная ответственность предприятия на этом не заканчивается, так как оно сохраняет обязательства по обеспечению функционирования

поставленных изделий в течение всего гарантийного периода с возможностью ремонта и модернизации в процессе постгарантийного обслуживания. В связи с этим формируется иная, не менее значимая потребность – обеспечение наличия запасных частей и компонентов для послепродажного сопровождения поставляемой продукции, эксплуатация которой осуществляется вне зоны прямого оперативного управления со стороны предприятия.

Потребность в быстрой и надежной замене узлов и агрегатов, как в рамках эксплуатации средств производства, так и в процессе сопровождения объектов производства, служит ключевым фактором, определяющим необходимость создания адаптивной, высокотехнологичной системы управления запасами.

АСУЗ должна интегрировать функции планирования, учета, оптимизации и мониторинга запасов, необходимых для обеспечения надежности и ремонтнопригодности средств производства и поставленных заказчикам объектов производства на протяжении ЖЦИ. Использование современных технологий, включая цифровые двойники и инструменты предиктивной аналитики, позволяет сформировать единый аналитический контур управления, способствующий повышению надежности производственной инфраструктуры и сокращению совокупных затрат на техническое обслуживание, ремонт и логистику запасных частей [8].

Основные этапы эксплуатации средств и объектов производства представлены на рисунке 2.

Предлагаемая модель параллельного управления ЖЦИ, реализуемая на основе цифровых двойников, служит основой для построения функциональной модели эксплуатации. На этапах активного использования и технической поддержки осуществляется сбор эксплуатационных данных, отражающих реальные условия функционирования, нагрузки, уровни износа и частоту отказов как собственного оборудования предприятия, так и поставленных заказчикам объектов производства.

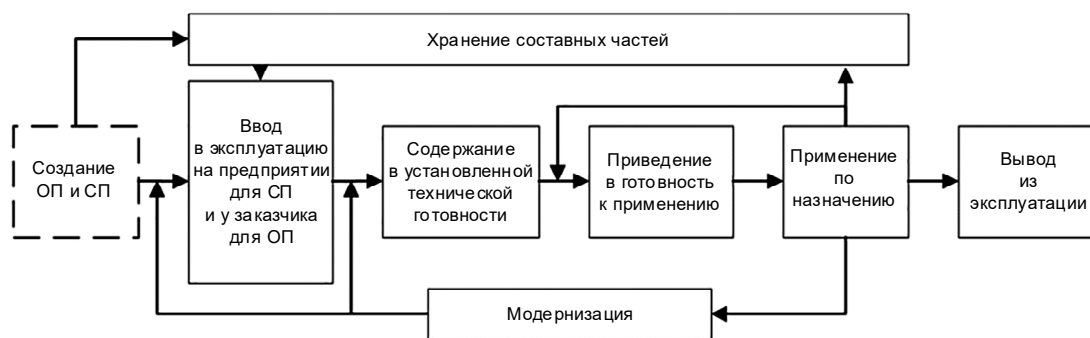


Рис. 2. Основные этапы эксплуатации объектов и средств производства

Fig. 2. Main stages of operation of objects and production means

Цифровые двойники, выступая в качестве динамически обновляемых виртуальных моделей физических объектов, обеспечивают сбор и обработку информации в режиме, приближенном к реальному времени. Полученные данные служат основой для построения *адаптивной модели объектов и средств производства*, выполняющей роль прогностико-аналитического ядра АСУЗ.

Назначение данной модели выходит за рамки традиционного мониторинга, так как она ориентирована на выявление устойчивых закономерностей, прогнозирование остаточного ресурса и вероятности отказов ключевых узлов и агрегатов в составе средств и объектов производства. В результате формируется прогноз потребности в элементах замены с учетом номенклатуры, временных параметров возникновения потребности, географической локализации и других факторов.

Такой подход обеспечивает переход от *реактивной* модели управления (по факту отказа) к *предиктивной* модели, основанной на планировании замены до наступления отказа, оптимизации сроков поставки и расчете оптимального уровня страхового запаса.

Эффективность предлагаемой модели эксплуатации напрямую определяет способность АСУЗ минимизировать потери производственного времени из-за дефицита запасных частей, а также обеспечивать выполнение сервисных обязательств перед заказчиками в рамках гарантийного и постгарантийного обслуживания поставленной продукции.

Формирование АСУЗ для этапа эксплуатации

Эксплуатация сложных технических систем (СТС) представляет собой важнейшую стадию ЖЦИ, на которой реализуются, поддерживаются и восстанавливаются их эксплуатационные свойства (технические характеристики). Качество управления на этой стадии напрямую влияет не только на эффективность достижения целей применения СТС, но и на ее долгосрочную надежность, безопасность, а также на экономичность эксплуатации, подразумевающую минимизацию времени простоя, рациональное использование всех видов ресурсов и оптимизацию срока службы [9].

В условиях усложнения СТС, увеличения требований к надежности и минимизации эксплуатационных затрат особую актуальность приобретает задача эффективного управления запасами элементов замены, от которых напрямую зависит непрерывность и устойчивость функционирования СТС.

АСУЗ представляет собой совокупность материальных и информационных потоков, охватывающих процессы формирования, хранения, пополнения и использования запасов с учетом текущих и прогнозируемых потребностей [10]. В ее структуру входят склады, логистические маршруты, центры учета и распределения, а также каналы получения информации о техническом состоянии оборудования и соответствующих требованиях к запасным частям, инструментам и принадлежностям (ЗИП).

Функционирование АСУЗ можно описать комплексом моделей, каждая из которых отражает отдельный процесс ее функционирования:

- модель спроса описывает закономерности возникновения потребности в запасных элементах, включая учет интенсивности отказов, наработки на отказ и особенности эксплуатационного профиля оборудования;
- модель поставок формализует механизмы доставки ЗИП, учитывая параметры логистики, планирования и снабжения;
- модель хранения отражает изменение технических и функциональных характеристик запасов во времени, включая факторы деградации и морального устаревания;
- модель затрат обеспечивает оценку экономической эффективности различных сценариев функционирования АСУЗ, позволяя рассчитать полные затраты на хранение, доставку, недостачу и избыточность запасов;
- модель выбора позволяет сформировать оптимальные стратегии поставок с учетом ограничений по бюджету, времени доставки, ресурсам хранения и заданным критериям эффективности.

Современная эксплуатационная практика демонстрирует возрастающую роль *систем мониторинга* технического состояния оборудования интегриро-

ванных с АСУЗ путем включения в ее состав следующих моделей:

- модель оценивания и прогнозирования технического состояния элементов оборудования, позволяющая учитывать не только текущее состояние, но и динамику его изменения во времени [11];
- модель расчета показателей надежности оборудования с учетом восстановления, отражающая вероятностный характер технических отказов и эффективность проводимых ремонтно-профилактических и ремонтно-восстановительных работ [12].

Переход к адаптивным стратегиям управления запасами становится возможен благодаря анализу информации, поступающей от систем мониторинга, с моделями прогнозирования технического состояния и потребностей в ЗИП [13]. Такая адаптивность позволяет соотносить потребление ресурсов с фактическим состоянием элементов оборудования и выбирать наилучший сценарий снабжения. В зависимости от уровня зрелости системы и доступных информационных ресурсов могут применяться различные стратегии:

- жесткое программное управление по календарным графикам;
- управление на основе фактического состояния;
- управление с использованием прогнозной аналитики, в котором учитываются предсказания на основе интеллектуальной обработки данных о состоянии оборудования [14].

Комплекс моделей адаптивного управления АСУЗ, применяемый в процессе эксплуатации СТС, обеспечивает возможность формирования оптимального состава и объема ЗИП на заданный период планирования. При этом учитываются как технические характеристики оборудования и текущие показатели его состояния, так и параметры хранения, логистики, ремонтных процессов и планов применения систем в будущем. Такой комплекс позволяет гибко варьировать подходы к управлению запасами, в том числе моделируя различные сценарии, – от эксплуатации без пополнения ЗИП до комбинированных схем с использованием плановых и экстренных поставок.

Комплекс моделей АСУЗ приведен на рисунке 3.

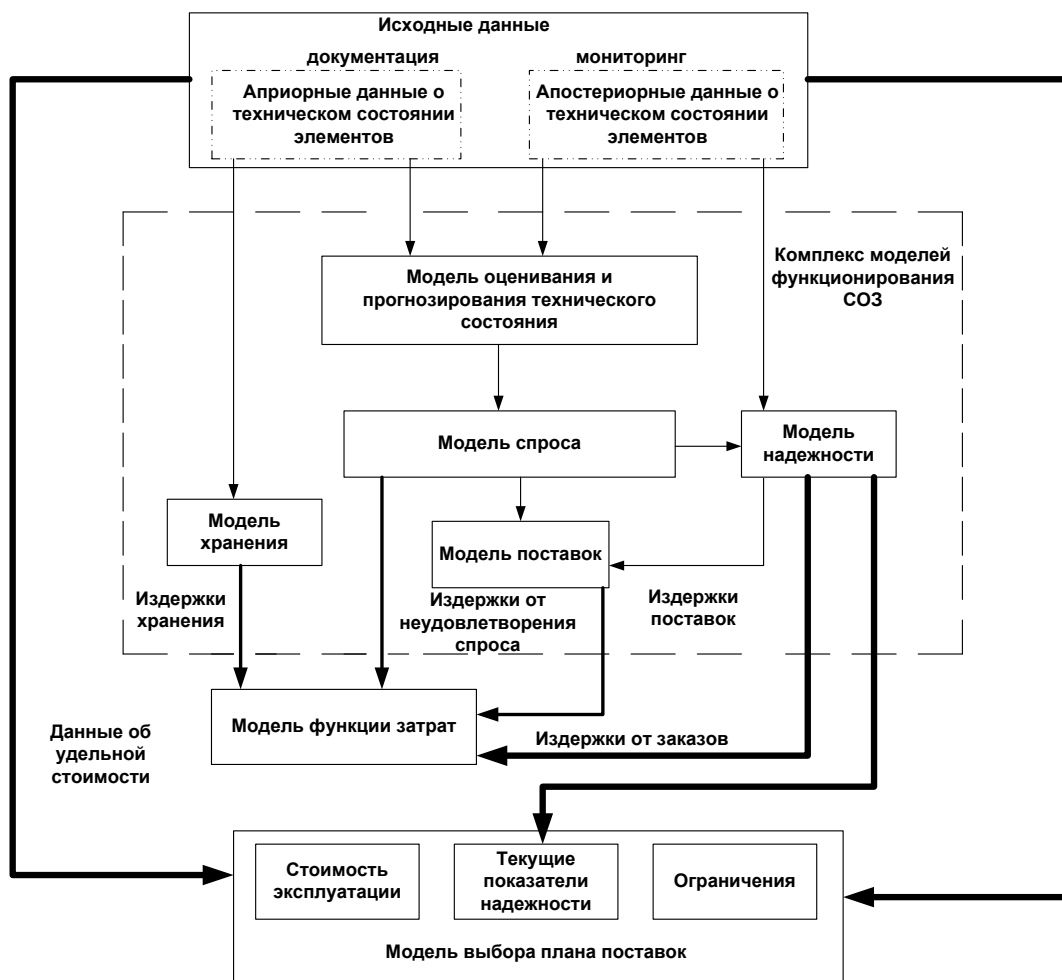


Рис. 3. Комплекс моделей АСУЗ в процессе эксплуатации СТС

Fig. 3. Complex of models of the AIMS in the operation process of CTS

Особенностью используемой модели является рассмотрение однокаскадной разомкнутой АСУЗ, в которой весь запасной фонд рассматривается как общий для множества СТС. Это отражает специфические условия эксплуатации СТС, в которых централизованное снабжение позволяет оптимизировать использование ресурсов, снижая общее количество необходимых запасов без ущерба для надежности эксплуатации.

Применение комплексных моделей адаптивного управления запасами позволяет получать количественные оценки ключевых параметров, таких как ожидаемое число отказов, потребность в ЗИП, сроки поставки и восстановления, а также показатели эффективности функционирования АСУЗ. Эти оценки, в свою очередь, являются основой для принятия обоснованных управленческих решений, направленных на снижение затрат, повышение готовности оборудования и снижение вероятности критических сбоев [15].

Информационная поддержка АСУЗ является критически важным элементом современного подхода к эксплуатации СТС. Для обеспечения устойчивой и эффективной работы АСУЗ необходимо создание единой цифровой модели, интегрированной с системами мониторинга, логистики и управления техни-

ческим обслуживанием. Цифровой двойник объекта эксплуатации, включающий в себя подпространство АСУЗ, становится ключевым инструментом для интеграции данных, прогнозирования сценариев и автоматизации управления. Такая модель позволяет оперативно пересчитывать показатели функционирования АСУЗ, формировать заказы, выстраивать логистические цепочки и принимать решения в режиме, приближенном к реальному времени.

Интеграция моделей адаптивного управления с системами цифрового проектирования, интеллектуального анализа данных и предиктивной аналитики позволяет значительно расширить функциональные возможности АСУЗ и повысить уровень автоматизации процессов [16]. В результате создается система, способная самостоятельно адаптироваться к изменениям условий эксплуатации, оптимизировать запасы, минимизировать издержки и обеспечивать высокую надежность СТС.

Методика формирования АСУЗ

АСУЗ базируются на концептуальном представлении предприятия как единой, целостной системы, в которой взаимосвязаны стадии ЖЦИ, – от разработки и производства до эксплуатации и утилизации [17]. Архитектура АСУЗ построена по трехуровневому принципу (рис. 4).

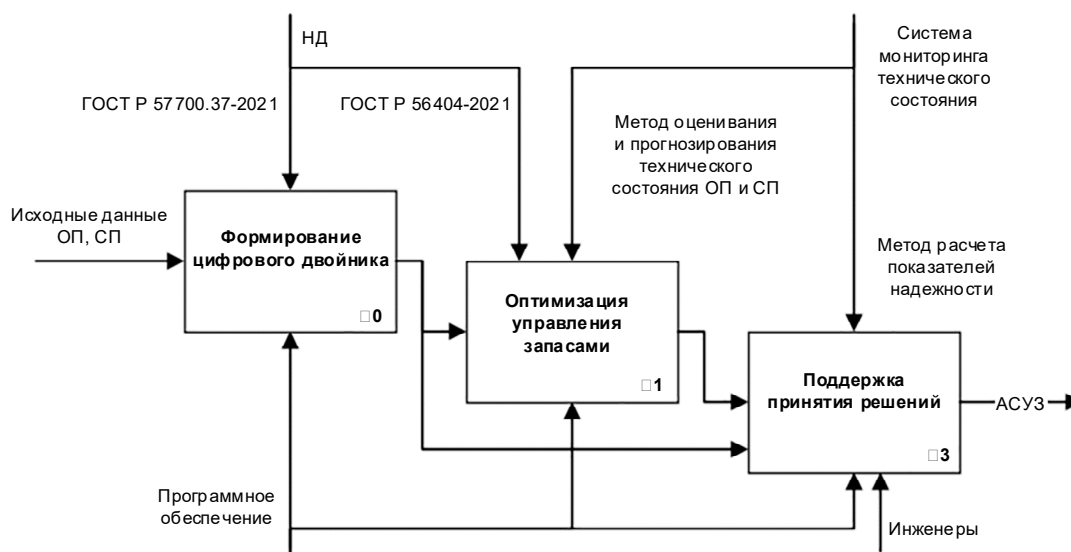


Рис. 4. Процесс формирования АСУЗ

Fig. 4. AIMS formation process

Ключевым элементом архитектуры выступает цифровой двойник (ЦД) изделия, функционирующий как сквозной интегратор данных ЖЦИ [18].

Предиктивная аналитика осуществляется за счет использования гибридных моделей LSTM и Survival Analysis. Обучение модели осуществляется на исторических данных средств и объектов производства [19].

Использование подхода позволяет не только прогнозировать отказы с точностью до 81 %, но и идентифицировать состав необходимых для ремон-

та комплектующих на основе ассоциативных правил, извлекаемых алгоритмом Apriori из исторических данных о ремонтах.

Оптимизация расходования ресурсов в этом случае осуществляется на основе данных цифровых паспортов изделий с учетом возможности повторного использования комплектующих.

Для реализации адаптивного управления запасами используется динамическая формула расчета уровня запаса, которая учитывает прогнозируемую потребность и риск срыва поставок:

$$s(t) = kD(t) + (1 - k)R(t),$$

где k – коэффициент надежности поставщика; D – прогноз на базе данных ЦД; R – оценка риска срыва поставки на основе телеметрии и рыночных данных; t – время.

Прогноз потребности формируется путем обработки в ЦД многомерных данных, а оценка риска срыва поставки вычисляется с учетом отклонения телеметрических параметров от базовых профилей, динамики рыночных индексов, бинарных маркеров внешних угроз. При превышении порога вероятности отказа $R \geq 0,85$ система инициирует каскадное увеличение запасов критических компонентов; например, для микросхем и соединителей срочный заказ возрастает. Это обеспечивает трехуровневую защиту: компенсацию времени доставки, нивелирование производственных простоев и соблюдение планового коэффициента готовности $K_r \geq 0,98$.

Сопоставление показателей эффективности традиционной системы управления запасами и разработанной АСУЗ демонстрирует ее качественное преимущество. Принятый в качестве 100%-го базового уровня средний объем запасов в традиционной модели по сути отражает систематическую избыточность, обусловленную субъективными корректировками и страховым запасом. В условиях нарушений поставок фактический уровень запасов может превышать 120...150 % от объективной потребности, что ведет к нерациональному расходованию ресурсов, росту логистических издержек и сохранению дефицита критических компонентов.

Внедрение АСУЗ позволило снизить фактический уровень запасов до 75 % за счет динамического расчета коэффициента запаса:

$$k_3(t) = f(P_{fail}, t_{пост}, R_{рынок}),$$

где P_{fail} – вероятность отказа; $t_{пост}$ – время доставки; $R_{рынок}$ – индекс дефицитности компонента.

Для критических компонентов алгоритм дополнительно учитывает: минимальные партии производителей, сроки повторного заказа, контрактные ограничения на кросс-проектное использование [20]. Результат – сокращение избытка запасов на 25 % при одновременном снижении риска дефицита с 18 до 3,7 % (см. таблицу). Экономия формируется не только за счет уменьшения складских площадей, но и высвобождения средств, «замороженных» в неликвидных позициях.

Сравнение АСУЗ и традиционной системы

Comparison of the AIMS and the traditional system

Метрика	Традиционная система	АСУЗ	Эффект
Средний уровень запасов	100 %	75 %	↓ 25 %
Время реакции на сбой	48 ч	12 ч	↓ в 4 раза
Простои из-за дефицита	15 случаев/год	2	↓ 87 %

Четырехкратное сокращение времени реакции АСУЗ на сбои достигается за счет автоматизированного мониторинга критических параметров; предиктивной диагностики на базе LSTM-сетей, идентифицирующей 92 % аномалий за $t < 10$ минут против 6...8 часов при традиционном анализе; автоматического формирования корректирующих мероприятий.

Снижение простоев на 87 % является прямым следствием работы алгоритма динамического резервирования, который при прогнозе отказа инициирует: пополнение запасов критических КРИ с учетом времени поставки; кросс-проектное перемещение компонентов в разрезе контрактных ограничений; превентивную замену деградирующих узлов в окнах технического обслуживания. Эффективность подтверждается снижением коэффициента простоя $K_{пр}$ с 0,15 до 0,02.

В условиях срыва поставки АСУЗ поддерживает минимально допустимый уровень запасов за счет предиктивного увеличения критических компонентов, основанного на прогнозах и мониторинге состояния оборудования. Традиционная система не обладает такой гибкостью и адаптивностью, что приводит к снижению запасов критических компонентов и, как следствие, риску остановки производственного процесса. Внедрение АСУЗ обеспечивает более высокий уровень устойчивости и эффективности управления запасами, что является ключевым фактором конкурентоспособности предприятий в высокотехнологичных отраслях.

Выводы

Разработанная АСУЗ обеспечивает качественный переход от реактивных к превентивным стратегиям поддержки эксплуатации СТС. Интеграция цифрового двойника, объединяющего данные мониторинга оборудования, логистические параметры и прогнозные модели, позволяет динамически оптимизировать запасы. Это снижает избыточность запасов на 25 % при одновременном уменьшении риска дефицита с 18 до 3,7 %. Система повышает устойчивость СТС через предиктивное увеличение запасов критических компонентов и кросс-проектное перераспределение ресурсов. Сокращение эксплуатационных издержек достигается за счет алгоритма динамического резервирования, уменьшающего простои на 87 %. Ключевое преимущество АСУЗ – четырехкратное ускорение реакции на сбои благодаря автоматизированному мониторингу, LSTM-диагностике и автоматизированному формированию корректирующих мер. Внедрение системы создает основу для конкурентоспособности высокотехнологичных предприятий, минимизирует риски остановки производства и оптимизирует ресурсный цикл в условиях нестабильности поставок.

Библиографические ссылки

1. Майкл Р. Линдерс, Харольд Е. Фирон. Управление снабжением и запасами. Логистика. М. : Виктория плюс, 2006. 768 с.

2. Булавин В. Ф., Яхричев В. В., Степанов А. С. Политика цифровых технологий на малых машиностроительных предприятиях // Известия вузов. Машиностроение. 2019. № 9. С. 35–45. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-9-35-45
3. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531
4. Дятлов В. О., Сыроизжков В. В. Модели и методы управления запасами предприятия // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 3-1. С. 40–42. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-3-1-40-42
5. Дунина А. А. Цифровые двойники на производстве как одно из направлений цифровой трансформации экономики // Стратегии бизнеса. 2022. № 10 (5). С. 114–116. DOI: 10.17747/2311-7184-2022-5-114-116
6. Масяев С. Н. Концепция построения структуры управления динамической системой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 40–46. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46
7. Селезнева С. В. Особенности создания автоматизированных систем управления в современных условиях // Наука и современность. 2010. № 1 (2). С. 121–123 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-sozdaniya-avtomatizirovannyh-sistem-upravleniya-v-sovremennyh-usloviyah> (дата обращения: 18.11.2025).
8. Хасанов А. Р. Влияние предиктивной аналитики на деятельность компаний // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3. С. 108–113. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-3-108-113
9. Кожина В. О., Тодорович М. В. Управление запасами как фактор повышения эффективности производства // Вестник Московского международного университета. 2024. № 2 (2). С. 106–112.
10. Орлов А. И. Бережливое производство: оптимизация запасов и управление качеством // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 184. С. 164–177.
11. Брускин С. Н. Модели и инструменты предиктивной аналитики для цифровой корпорации // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2017. № 5. С. 135–139. DOI: 10.21686/2413-2829-2017-5-135-139
12. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 517–531.
13. Кауза Г. Применение цифрового двойника в соответствии со стандартом ISO 23247 к гибким производственным процессам // Appl. Sci. 2024. Т. 14, № 4204. С. 1–19.
14. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочков Е. И. Информационные технологии в проектировании и производстве. СПб: Политехника, 2008. 304 с. ISBN 978-5-7325-0898
15. Цифровизация экономических систем: теория и практика : монография / под ред. А. В. Бабкина. Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2020. 795 с.
16. Абрамов В. И., Борзов А. А. Роль инновационного потенциала при цифровой трансформации компании // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. 2022. № 2. С. 5–13.
17. Никифоров А. Д., Бакиев А. В. Процессы жизненного цикла продукции в машиностроении : монография. М. : Абрис, 2011. 688 с.
18. Щеглов Д. К., Пиликов Н. А., Тимофеев В. И. Концептуальные основы цифровой трансформации организа-

ций оборонно-промышленного комплекса // Автоматизация в промышленности. 2021. № 2. С. 13–23.

19. Теоретические основы применения концепции цифровых двойников для создания интеллектуальной системы мониторинга технического состояния и обслуживания сложной наукоемкой продукции / Д. К. Щеглов, М. Н. Ещенко, А. П. Борова, А. А. Ухов // Судостроение. 2023. № 5 (870). С. 21–26.

20. Щеглов Д. К. Применение технологий анализа больших данных в процессах организации проектно-конструкторских работ // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78. № 5. С. 201–208.

References

1. Michael R. Linders, Harold E. (2006) [Fearon. Supply and Inventory Management. Logistics]. Moscow: Victoria Plus, 768 p. (in Russ.).
2. Bulavin V.F., Yakhrichiev V.V., Stepanov A.S. (2019) [Digital Technology Policy at Small Machine-Building Enterprises]. *Novosti universitetov. Mashinostroenie*, no. 9, pp. 35–45. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-9-35-45 (in Russ.).
3. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. (2021) [Digital Twins in Industry: History of Development, Classification, Technologies, and Use Cases]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, no. 7, pp. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531 (in Russ.).
4. Dyatlov V.O., Syroizhkov V.V. (2021) [Models and methods of enterprise inventory management]. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, no. 3-1, pp. 40–42. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-3-1-40-42 (in Russ.).
5. Dunina A.A. (2022) [Digital twins in production as one of the directions of digital transformation of the economy]. *Biznes-strategii*, no. 10, pp. 114–116. DOI: 10.17747/2311-7184-2022-5-114-116 (in Russ.).
6. Masayev S.N. (2021) [Concept of Building a Dynamic System Control Structure]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, vol. 64, no. 1, pp. 40–46. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46 (in Russ.).
7. Selezneva S.V. (2010) [Features of Creating Automated Control Systems in Modern Conditions]. *Nauka i sovremennost'*, no. 1, pp. 121–123 [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-sozdaniya-avtomatizirovannyh-sistem-upravleniya-v-sovremennyh-usloviyah> (accessed: 18.11.2025) (in Russ.).
8. Khasanov A.R. (2018) [The Impact of Predictive Analytics on Company Performance]. *Strategicheskie resheniya i upravlenie riskami*, no. 3, pp. 108–113. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-3-108-113 (in Russ.).
9. Kozhina V.O., Todorovich M.V. (2024) [Inventory Management as a Factor in Improving Production Efficiency]. *Vestnik Moskovskogo mezhdunarodnogo universiteta*, no. 2, pp. 106–112 (in Russ.).
10. Orlov A.I. (2022) [Lean Manufacturing: Inventory Optimization and Quality Management]. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, no. 184, pp. 164–177 (in Russ.).
11. Bruskin S.N. (2017) [Models and Tools of Predictive Analytics for a Digital Corporation]. *Vestnik Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova*, no. 5, pp. 135–139. DOI: 10.21686/2413-2829-2017-5-135-139 (in Russ.).
12. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. (2021) [Digital Twins in Industry: History of Development, Classification, Technologies, and Use Cases]. *Izvestiya universitetov. Priborostroenie*, vol. 64, no. 7, pp. 517–531 (in Russ.).
13. Kaiza G. (2024) [Application of a Digital Twin in Accordance with the ISO 23247 Standard to Flexible Manufactur-

ing Processes]. *Prikladnaya nauka*, vol. 14, no. 4204, pp. 1-19 (in Russ.).

14. Zilberburg L.I., Molochnik V.I., Yablochkov E.I. (2008) *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information Technologies in Design and Production]. St. Petersburg: Politehnika Publ., 304 p. ISBN 978-5-7325-0898 (in Russ.).

15. Babkin A.V. (ed.) (2020) *Cifrovizatsiya ekonomicheskikh sistem: teoriya i praktika* [Digitalization of Economic Systems: Theory and Practice]. St. Petersburg: Politekh-Press Publ., 795 p. (in Russ.).

16. Abramov V.I., Borzov A.A. (2022) [The Role of Innovative Potential in a Company's Digital Transformation]. *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya*, no. 2, pp. 5-13 (in Russ.).

17. Nikiforov A.D., Bakiev A.V. (2011) *Processy zhiznennogo tsikla produktsii v mashinostroenii* [Product Life Cycle

Processes in Mechanical Engineering]. Moscow: Abris Publ., 688 p. (in Russ.).

18. Shcheglov D.K., Pilikov N.A., Timofeev V.I. (2021) [Conceptual Foundations of Digital Transformation of Defense Industry Organizations]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, no. 2, pp. 13-23 (in Russ.).

19. Shcheglov D.K., Yeshchenko M.N., Borina A.P., Ukhov A.A. (2023) [Theoretical Foundations of Applying the Digital Twin Concept to Create an Intelligent System for Monitoring the Technical Condition and Maintenance of Complex Science-Intensive Products]. *Sudostroenie*, no. 5, pp. 21-26 (in Russ.).

20. Shcheglov D.K. (2024) [Application of big data analysis technologies in the processes of organizing design and engineering works]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, vol. 78, no. 5, pp. 201-208 (in Russ.).

Adaptive Enterprise Inventory Management System Based on Digital Twins and Predictive Analytics

E.S. Kuznetsova, Submicron Research Institute, Moscow, Russia

D.K. Shcheglov, PhD in Engineering, Associate Professor, Northwestern Regional Center of the Almaz-Antey Air Defense Concern - Obukhov Plant, St. Petersburg, Russia

The article focuses on the development of an Adaptive Inventory Management System (AIMS) for replacement parts of complex technical systems at the operational stage. The objective of the study is to develop a model for managing inventory of replacement components that will improve reliability and reduce costs for maintenance and repair of production equipment. The research is driven by the need to enhance the reliability and cost-effectiveness of maintaining production means and objects amidst growing demands for their uninterrupted operation. The scientific novelty lies in the synthesis of a three-level architecture that integrates product digital twins, predictive analytics, and hybrid machine learning models (LSTM, Survival Analysis) for the dynamic calculation of optimal inventory levels. A key differentiator of the proposed methodology is the implementation of dynamic reservation based on supply disruption risk assessment and failure prediction with 81 % accuracy, utilizing the Apriori algorithm to identify repair kit composition. The proposed solution enables a transition from a reactive to a predictive management model. Practical testing shows significant improvement in key metrics: a 25 % reduction in average inventory levels, a 4-fold decrease in response time to failures (to 12 hours), and an 87 % reduction in downtime due to stockouts while maintaining a readiness factor of $K_g \geq 0.98$. The implementation of the Adaptive Inventory Management System lays the foundation for increasing the competitiveness of high-tech enterprises by optimizing the resource cycle and minimizing production stoppage risks.

Keywords: adaptive inventory management, digital twin, predictive analytics, product lifecycle, complex technical systems, dynamic reservation.

Получено 09.09.2025

Образец цитирования

Кузнецова Е. С., Щеглов Д. К. Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 4. С. 56–63. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-56-63

For Citation

Kuznetsova I.S., Shcheglov D.K. (2025) [Adaptive Enterprise Inventory Management System Based on Digital Twins and Predictive Analytics]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 4, pp. 56-63. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-56-63 (in Russ.).