

DOI:

MES СИСТЕМЫ КАК НЕОТЪЕМЛЕМОЕ ЗВЕНО ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Макаров В.В.,

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

makfone@mail.ru

Фролов Е.Б., Паршина И.С.,

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Россия, г. Москва, Вадковский пер., д.3а*

fobos.mes@gmail.com, skyla95@rambler.ru

Ушакова М.В.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4*

UshakovaMV@misis.ru

Аннотация: Показаны место и роль MES-систем в цифровизации производства. Рассмотрены виды «фабрик будущего» и их основные характеристики. Выявлены возможности цифровой платформы для автомобильной промышленности. Доказана необходимость трансформации бизнес-процессов с использованием CPS-систем как интегрированных кибер-физических систем.

Ключевые слова: цифровизация производства, фабрика будущего, ERP-система, MES-система, CPS-система, цифровой двойник предприятия.

Введение

Развитие промышленных отраслей представляет собой баланс между использованием новых технологий и выпуском продукции в рамках бюджета. Но использование новых разработок влечет за собой риск возникновения ошибок при получении прототипа, которые были сделаны на этапе проектирования.

В настоящее время на большинстве промышленных предприятиях внедрены различные информационные системы. Каждая из них предназначена для оптимизации определенной части производственного процесса, а их совместное использование повышает эффективность управления производством в целом. Но на сегодняшний момент подавляющее большинство предприятий придерживается концепции централизованного и жесткого среднесрочного и долгосрочного планирования производства, что не соответствует современной тенденции «как только», что означает моментальную реакцию на любые изменения. Выходом из этой ситуации является создание интеллектуального завода (производства), работающего в режиме реального времени с самооптимизацией, а путем к этому переходу служит цифровая трансформация.

Цифровая трансформация (цифровизация) подразумевает под собой коренные изменения в структуре, процессах и бизнес-модели компании. При этом мы получаем единое информационное пространство для всех рабочих мест на предприятии, которое подразумевает под собой оперативный обмен достоверными, корректными и объективными данными между всеми автоматизированными системами управления и оборудованием, что и обеспечивает высокую эффективность работы всего предприятия. Таким образом, мы получаем единое информационное пространство, которое содержит в себе следующие уровни (от нижнего к высшему): Мониторинг (MDS – АСУ ТП), Проектирование (CAD), Технологический уровень (CAM/CAE/PDM), Уровень производства (MES), Уровень бизнеса (ERP), Уровень стратегического управления (BPM).

В работе рассматриваются уровень производства и уровень бизнеса, а главным образом роль MES-системы в процессе цифровизации производства, так как именно она является связующим звеном между ERP-системами, которые необходимы для поддержания всех финансово-хозяйственных операций, и оперативной производственной деятельности предприятия на всех уровнях от отдельного рабочего места до всей производственной линии. MES также является связующим звеном между разработанным цифровым двойником (основным понятием Индустрии 4.0) и остальными системами предприятия, а также позволяет вести расчет экономических показателей для осуществления оперативного управления.

1 Цифровая трансформация производственного предприятия

1.1 Виды «фабрик будущего» («Factories of the future») и этапы перехода к ним

Термин «фабрика будущего» был введен ассоциацией «Технет», которая представляет собой объединение научных, образовательных и промышленных организаций и их представителей, которые нацелены на исследование, разработку, производство и эксплуатацию технологических решений с целью обеспечения конкурентоспособности отечественных компаний. Главным же направлением их работы являются технологии цифрового проектирования и моделирования, аддитивные технологии, новые материалы, сенсорика, передовая робототехника, индустриальный интернет, Big Data, CNC-технологии [1].

Также «Технет» — это «дорожная карта» Национальной технологической инициативы, которая разработана для развития и эффективного применения «сквозных технологий», а именно новых производственных технологий. Данная дорожная карта включает в себя:

- цифровое проектирование и моделирование – совокупность технологий для компьютерного проектирования и моделирования, таких как: CAD – Computer-Aided Design, CAE - Computer-Aided Engineering, HPC - High Performance Computing, CAO - ComputerAided Optimization, CAM - Computer-Aided Manufacturing, CAAM - Computer-Aided Additive Manufacturing, PDM - Product Data Management и PLM - Product Lifecycle Management;
- новые материалы;
- аддитивные и гибридные технологии – использование 3D-технологий;
- робототехнику – внедрение и использование промышленных роботов;
- промышленную сенсорика – использование на цеховом и/или производственном уровне «умных» сенсоров и инструментов управления (контроллеров);
- индустриальный Интернет – связь между ИТ-системами, оборудованием и датчиками на предприятии;
- большие данные (Big Data) – работа с большими данными: генерация, сбор, хранение, управление, обработка и передача;
- информационные системы управления производством и предприятием: ICS - Industrial Control System, MES - Manufacturing Execution System, ERP - Enterprise Resource Planning, EAS - Enterprise Application Software;
- технологии виртуальной и дополненной реальности;
- искусственный интеллект [2].

Основным понятием дорожной карты «Технет» является «фабрика будущего». Это понятие идентично термину «Smart Manufacturing», введенному Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST) – корпоративные системы, которые полностью интегрированы между собой, обладающие возможностью в реальном времени реагировать на изменяющиеся условия производства, требования сетей поставок и удовлетворять потребности клиентов [3].

«Фабрики будущего» подразделяются на три вида: цифровые (Digital), «умные» (Smart) и виртуальные (Virtual), характеристики каждого представлены в таблице 1 [4].

Таблица 1. Виды «фабрик будущего»

Вид фабрики	Основная цель	Технологии
Цифровая фабрика (Digital Factory)	Использование средств цифрового проектирования и моделирования для разработки моделей выпускаемых продуктов. Цифровое проектирование берет свое начало еще на этапе исследований и разработок и результатом становится создание «цифрового макета» (Digital Mock-Up, DMU), «цифрового двойника» (Digital Twin), опытного образца, выпуском мелкой серии или отдельных изделий, которые созданы под требования определенного заказчика	Система автоматизированного проектирования: CAD/CAM/CAE PDM (Product Data Management) – системы управления данными об изделии PLM (Product Lifecycle Management) – системы управления жизненным циклом продукции Станки с ЧПУ Аддитивные технологии
«Умные» фабрики (Smart Factory)	Содержат в себе основные цели цифровой фабрики, но плюс к ним ставят перед собой основной задачей серийный выпуск изделий при сохранении максимальной гибкости производства. Удовлетворение этих требований происходит через обеспечение высокого уровня автоматизации и роботизации предприятия.	АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами APS (Advanced Planning and Scheduling) – синхронное (усовершенствованное) планирования производства MES (Manufacturing Execution System) – система управления производственными процессами ИИТ (Industrial Internet of Things) – промышленный (индустриальный) интернет вещей Big Data
Виртуальная фабрика (Virtual Factory)	Цепь цифровых и «умных» фабрик, включающая в себя поставщиков материалов, компонентов и услуг. Разработка и использование виртуальной модели всех процессов, проходящих не только на предприятии, но на уровне распределенных производственных активов и глобальных цепочек поставок, вплоть до послепродажного обслуживания.	ERP (Enterprise Resource Planning) – планирование ресурсов предприятия CRM (Customer Relationship Management) – система управления взаимоотношениями с клиентами SCM (Supply Chain Management) – управление цепочками поставок.

Следовательно, можно выделить следующие этапы для перехода к концепции «умного» производства и подготовки для перехода к виртуальной фабрике:

- Цифровизация производства – установка нового оборудования, уже оснащенного цифровыми интерфейсами либо модернизация уже существующего оборудования. Обеспечение персонала мобильными платформами.
- Обеспечение сетевого взаимодействия всех устройств и датчиков через IoT.

- Создание цифрового двойника предприятия (digital twin) – позволяет визуализировать происходящие процессы на предприятии, что в свою очередь ведет к выявлению отклонений от норм при выполнении бизнес-процессов предприятия.
- Обеспечение достоверности и полезности оперативной информации через синхронизацию данных из различных источников.
- Планирование в реальном времени.
- Автоматическая реакция системы на большинство процессов происходящих на производстве.

1.2 Изменение бизнес-процессов в условиях цифровой трансформации

Говоря о бизнес-процессах в условиях цифровой информации, необходимо принять во внимание одно важное условие, которое позволит сказать, что предприятие провело оптимизацию бизнес-процессов в предполагаемых условиях: все бизнес-процессы: планирование, производство, распределение и продажи – автоматизированы и интегрированы в рамках единой информационной системы [5].

В таблице 2 приведём сравнение завода, существующего на текущий момент времени, и завода в рамках Индустрии 4.0. на основе характеристик и обеспечивающих их технологий.

Таблица 2. Сравнительная характеристика заводов

	Источник данных	Завод (сегодня)		Завод (Индустрия 4.0)	
		Характеристика	Технологии	Характеристика	Технологии
Деталь	Сенсор	Точность	«Умные» датчики и обнаружение неисправностей	Самосознание Самостоятельное определение поведения	Мониторинг ухудшений и необходимости предупредительного ремонта
Станок	Контроллер	Производительность и эффективность	Мониторинг и диагностика состояния	Самосознание Самостоятельное определение поведения Самосравнение	Непрерывная работа с отслеживанием состояния
Производственная система	Сетевая система	Выход продукции и OEE ¹	Бережливое производство: устранение всех потерь	Самостоятельное конфигурирование Самостоятельная поддержка Самоорганизация	Безупречная продуктивность

На практике необходимо построение кибер-физической системы CPS (Cyber Physical System), так как она является одной из ключевых технологий при проектировании и использовании «умных» фабрик. Для ее построения необходимо получить данные в режиме реального времени с производственных линий: производительность, качество выпускаемой продукции и эффективность логистических процессов.

На рисунке 1 представлена пятиступенчатая архитектура CPS, которая является пошаговым руководством для разработки и развертывания данной системы в условиях производства. Как правило, CPS состоит из двух основных функциональных компонентов:

- расширенные возможности подключения, которые обеспечивают в режиме реального времени получение данных из физического мира и обратную связь из киберпространства;
- интеллектуальное управление данными, аналитика и вычислительные возможности, которые создают киберпространство.

¹ OEE - Overall Equipment Effectiveness – общая эффективность оборудования

Но представленные требования достаточно абстрактны для построения системы. Пятиступенчатая архитектура представляет процесс построения CPS от сбора данных до аналитики и создания окончательного продукта.

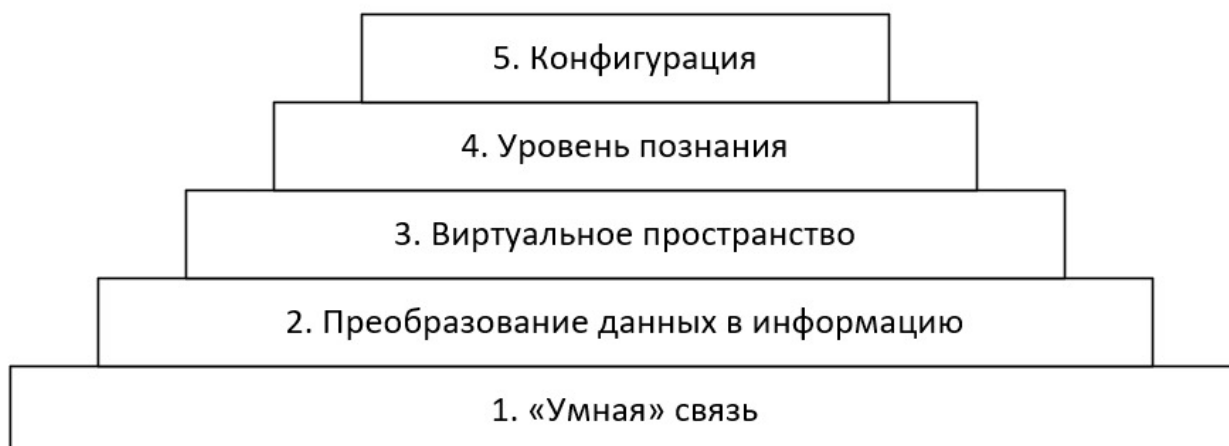


Рис. 1. Пятиступенчатая архитектура CPS-системы

В соответствии с рисунком 1 уровни включают в себя следующее:

1. «Умная» связь - получение точных и надежных данных с оборудования и его компонентов - является первым шагом в разработке кибер-физической системы. Данные могут быть измерены непосредственно датчиками или получены от контроллера, или с помощью корпоративных производственных систем, таких как: ERP, MES, SCM и CMM.
2. Преобразование данных в информацию – значимая информация должна быть получена из данных. Чтобы принимать эффективные управленческие решения необходимо использовать проверенные методики («best practice») для извлечения данных из информации.
3. Виртуальное пространство – на любом предприятии приходится обрабатывать большой объем информации, при этом данный процесс должен быть максимально эффективен для ее оперативного использования. Достигнуть этого можно благодаря переходу информационных потоков в виртуальное пространство.
4. Уровень познания – построение процессов и систем для управления и распространения знаний на предприятии.
5. Конфигурация – описание способов взаимодействия между физической и виртуальной средой, что позволяет организовать эффективную и автономную работу оборудования [6].

Соответственно, когда возникает потребность цифровизации производства, следует принимать во внимание не только необходимость оптимизации бизнес-процессов, но и обязательную реализацию интегрированной информационной системы, а в большинстве случаев именно внедрение информационной системы и является тем средством, которое применяется для оптимизации. Целями оптимизации могут быть:

- Сокращение шагов бизнес-процесса;
- Уменьшение количества этапов согласования;
- Изменение последовательности шагов бизнес-процессов;
- Параллельное исполнение процессов;
- Уменьшение стоимости, трудозатрат, задействованного персонала, как во всем бизнес-процессе, так и в отдельных его этапах;
- Устранение «узких» мест.

При этом каждая компания развивается по своему пути, и, соответственно, каждое предприятие выбирает свой собственный уникальный путь оптимизации, согласующийся с определенными, нуждами, стратегиями и планами развития бизнеса.

При цифровизации производства и трансформации бизнес-процессов необходимо учитывать требования ГОСТ Р ИСО 15704-2008, который устанавливает требования к стандартным архитектурам предприятия и методологиям, а также требования по их соответствию полному (завершенному) представлению стандартной архитектуры предприятия и методологиям. Данный стандарт применим как на этапе создания предприятия, так и на этапах выполнения работ по реструктуризации

предприятия и нарастающих изменений, распространяющихся только на части жизненного цикла предприятия.

Для оценки эффективности цифрового производственного процесса используют два численных показателя:

- Всеобщая эффективность станочной системы – коэффициент ОЕЕ – показатель плотности загрузки оборудования;
- Эффективность операционного цикла – коэффициент МСЕ (Manufacturing Cycle Effectiveness) – показатель скорости обработки деталей и сборочных единиц в производственных подразделениях предприятия.

Анализ поведения «цифровой модели» производственной системы производится через коэффициент ОЕЕ, а именно происходит измерение доли планируемого производственного времени, которое необходимо для изготовления детали без учета незавершенного производства.

Формула для расчета коэффициента ОЕЕ (1):

$$(1) OEE = K_{вр} * K_{пр} * K_{кач} = \frac{\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]}{\sum_j [\Phi_{врj}]} * \frac{\sum_i [T_i * Выр_i]}{\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]} * \frac{\sum_i [T_i * (Выр_i - Б_i)]}{\sum_i [T_i * Выр_i]}$$

Здесь $K_{вр}$ – коэффициент времени (доступность), $K_{пр}$ – коэффициент производительности (эффективность работы), $K_{кач}$ – коэффициент качества (уровень качества), j – количество единиц оборудования, $\Phi_{врj}$ – фонд времени работы j -ой единицы оборудования (время рабочей смены), $Пр_j$ – простой j -ой единицы оборудования, в том числе плановые (ППР, наладка и пр.), i – количество продуктов, производимых на данной единице оборудования, T_i – такт выпуска i -ого продукта, $Выр_i$ – количество изготовленного i -ого продукта в течение $\Phi_{вр}$, $Б_i$ – количество брака i -ого продукта изготовленного в течение $\Phi_{вр}$, $\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]$ – время, имеющееся для выпуска продукции на j -ой единице оборудования, $\sum_i [T_i * Выр_i]$ – количество времени, потраченного на производство продукции, $\sum_i [T_i * (Выр_i - Б_i)]$ – количество времени, потраченного на производство годной продукции.

Второй показатель, который описывает цифровую модель производства – это коэффициент МСЕ, который является отношением трудоемкости технологических операций, которые выполняются при обработке изделий, к времени пребывания этих изделий в соответствующих производственных подразделениях.

Расчет коэффициента МСЕ по формуле (2):

$$(2) MCE_{ik} = \frac{T_{ik} * Выр_{ik}}{\sum_j \Phi_{врj}}$$

Здесь $Выр_{ik}$ – выработка k -ого производственного участка по деталям, входящим в i -й продукт, T_{ik} – такт выпуска i -ой продукции на участке k , $\Phi_{врj}$ – фонд времени работы j -ой единицы оборудования.

Из этого следует, что коэффициент ОЕЕ характеризует плотность загрузки оборудования, которое моделируется в цифре, а коэффициент МСЕ является характеристикой динамики материального потока в цифровом двойнике производственной системы [7].

В качестве примера реализации расчета данных показателей можно привести российскую MES-систему «ФОБОС». На рисунке 2 представлена визуализация оценки критерия ОЕЕ, а на рисунке 3 – оценка критерия МСЕ.

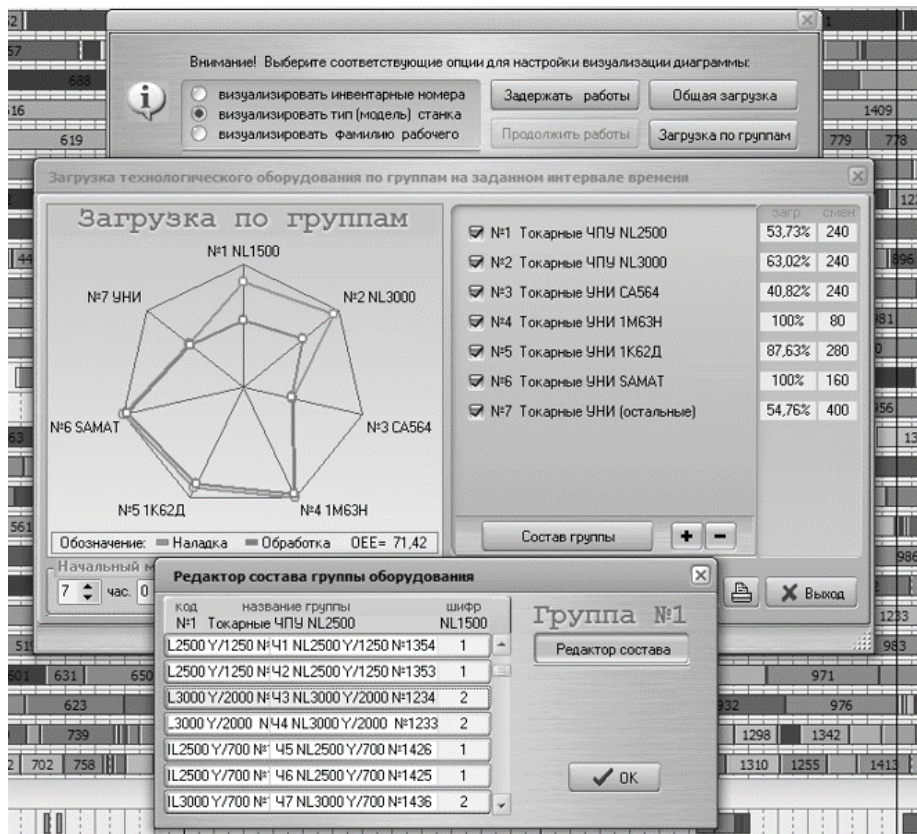


Рис. 2. Визуализация оценки критерия ОЕЕ

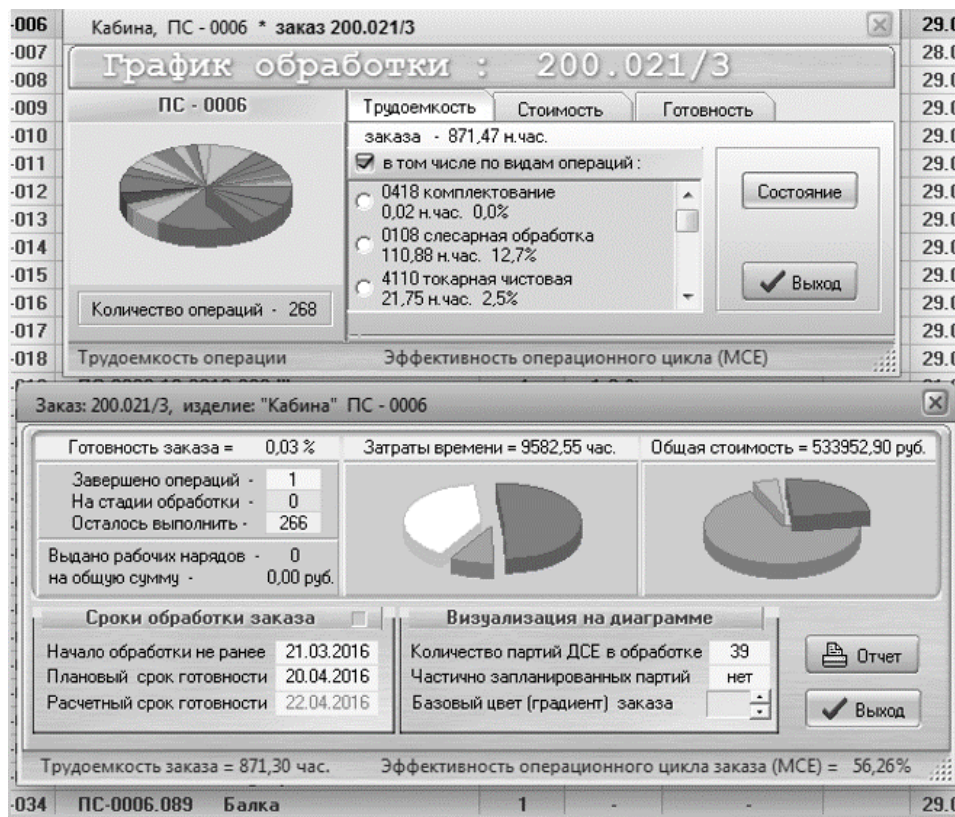


Рис. 3. Визуализация оценки критерия МСЕ

2 Концепция цифровой поддержки развития производства

В статье [8] было рассмотрено применение цифровых двойников для оптимизации деятельности на предприятиях. В качестве методики разработки предлагалось использование языка SysML как

графического языка моделирования для описания цифрового двойника в разрезе: диаграмм требований, поведенческих диаграмм и др. в зависимости от выбора сложности реализации. Была разработана детальная спецификация легкового автомобиля в упрощенном варианте диаграммы SysML, содержащая только следующие диаграммы: диаграмма пакетов, диаграмма требований, диаграмма действий, диаграмма определения блоков, внутренняя блок-схема, параметрическая диаграмма. С помощью диаграмм была рассмотрена спецификация автомобиля с точки зрения требований к его техническим характеристикам и уровню комфорта, а также продемонстрирована подробная работа двигателя, состав, а также его параметры.

Однако построение таких диаграмм, это лишь основа для построения цифрового двойника и, впоследствии, всей цифровой платформы. Что же может дать производству построение полноценной цифровой платформы?

Рассмотрим возможности цифровой платформы для автомобильной промышленности, как продолжении идеи, представленной в статье [8]. Цифровая платформа может предоставить следующие возможности для производства автомобилей:

- Увеличение количества моделей автомобилей за счет изменения конфигурации автомобилей: типа кузова, комплектации и т.д.
- Серийное производство специальных автомобилей (например, под индивидуальный заказ);
- Предоставление возможности быстрого выхода на новые рынки через ускоренную адаптацию продукции;
- Усложнение продукции при неизменной цене.

При этом основными составляющими для цифровой платформы являются: системы управления жизненным циклом продукции (PLM), использование таких систем как: CAD\CAM\CAE для цифрового проектирования продукции и самих технологических процессов, MES-системы и IoT – для управления производством [9]. Посредством использования цифровой платформы можно перевести технологические процессы создания автомобиля в полностью цифровой вид и подвергнуть готовую цифровую модель испытаниям (тестированиям) (рис. 4).

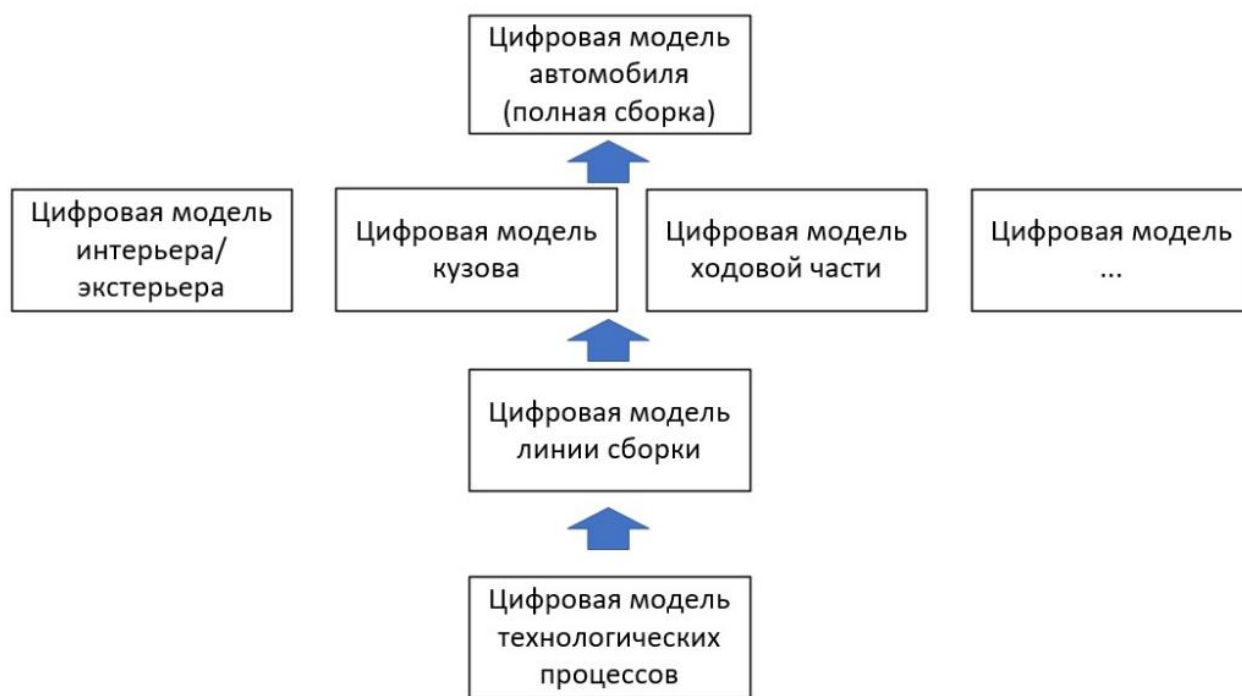


Рис. 4. Цифровая модель автомобиля

В ходе цифрового тестирования полученных моделей автомобиля будет легче прогнозировать и выявлять на ранних стадиях преимущества и недостатки прототипа, вносить необходимые исправления и при этом не затрачивать ресурсы для физического производства.

Результаты исследования могут быть применены для создания цифровых двойников предприятий любых отраслей промышленности.

Заключение

В рамках исследования проанализированы цифровая трансформация производственного предприятия и концепция цифровой поддержки развития производства, выявлены их техническая и бизнес- составляющие. Показано, что MES-системы играют важную роль в каждой из них, являясь:

- Одна из технологий для «умных» фабрик (Smart Factory);
- Поставщик данных для CPS-систем;
- Часть цифровой платформы в применении к автомобильной промышленности.

Литература

1. Ассоциация «Технет». Инфраструктурный центр «Технет» // Технет (Национальная технологическая инициатива). URL: <https://technet-nti.ru/> (режим доступа 25.05.2020)
2. Национальная технологическая инициатива (НТИ) // ИЦ "Центр компьютерного инжиниринга" СПбПУ. URL: <http://fea.ru/compound/national-technology-initiative> (режим доступа 25.05.2020)
3. What is the Smart Factory // Manufacturing Tomorrow. URL: <https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2017/02/what-is-smart-manufacturing--the-smart-factory/9166> (режим доступа 25.05.2020)
4. Smart Factory - умное производство // IT enterprise. URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/smart-factory> (режим доступа 25.05.2020)
5. *Лисовский А.Л.* Оптимизация бизнес-процессов для перехода к устойчивому развитию в условиях четвертой промышленной революции // Стратегические решения & риск менеджмент, - 2018. - № 4 (109). – с. 10-18
6. *Lee J., Bagheri B., Kao H. A.* A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters, 2015. - № 3. – с. 18–23
7. *Фролов Е.Б., Паршина И.С., Зайцев А.С., Климов А.С.* Индустрия 4.0: «Цифровой двойник» как средство повышения эффективности производственной системы // Научные технологии в машиностроении, - 2019. - № 2 (92). – с. 42-48
8. *Макаров В.В., Фролов Е.Б., Паршина И.С., Ушакова М.В.* Концепция разработки цифрового двойника // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019) [Электронный ресурс]: материалы Двенадцатой междунар. конфер, 1–3 окт. 2019 г., Москва, - 2019. – с. 1252-125
9. *Makarov, V.V., Frolov, Y.B., Parshina, I.S., Ushakova, M.V.* The design concept of digital twin Proceedings of the 12th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2019 URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076392376&doi=10.1109%2fMLSD.2019.8911091&partnerID=40&md5=3d7037393e0e7f372ec68e796d109ee> DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911091 (режим доступа 25.05.2020)