

Практическая реализация MBSE-подхода

в продуктах и решениях отечественных вендоров



Андрей КАНИБЕЦ,
аналитик систем жизненного цикла изделий,
компания АСКОН

Если говорить простыми словами, MBSE – это когда сложные системы проектируют не через комплекты документов, а через единую цифровую модель, которая живёт с изделием от замысла до его утилизации. В России к этой методологии присматриваются особенно пристально – не потому что это модно, а потому что предприятия ищут пути повышения своей эффективности и MBSE выглядит перспективным направлением в условиях цифровой трансформации и обеспечения технологического суверенитета страны.

Почему это направление стало важным? Во-первых, в отраслях вроде авиастроения или ракетно-космической промышленности ошибки на этапе проектирования обходятся слишком дорого. Мировая практика показывает:

О системной инженерии, основанной на моделях, или MBSE (Model-Based Systems Engineering), написано много различных материалов, особенно о преимуществах ее использования для сложных изделий. В этой статье попробуем взглянуть на такой подход в системной инженерии через призму актуальности и перспектив его применения в отечественной промышленности.

с модельным подходом количество переделок при стыковке подсистем снижается примерно на четверть. А для сложных заказов, где сроки очень важны, такой эффект экономии времени не роскошь, а необходимость. Во-вторых, в условиях дефицита кадров цифровая трансформация предприятия с использованием MBSE-подхода должна помочь существующим специалистам работать продуктивнее.

В отличие от прежней документоориентированной парадигмы переход к MBSE представляет собой не просто смену формы представления инженерной документации, а глубокую трансформацию самого подхода к проектированию, управлению данными и инженерному мышлению в целом.

Главным барьером на этом пути остается высокий порог входа. Внедрение методологии требует модернизации программных инструментов и инфраструктуры, однако наибольших ресурсов требует не техника, а люди. Необходимо обучение специалистов и комплексная перестройка устоявшихся процессов разработки. Тем не менее, бизнес все чаще готов инвестировать в подобные изменения, поскольку сохранение традиционных практик сопряжено с существенно более высокими рисками.

Классическая модель, в которой требования распределены по множеству документов и таблиц, обладает системным недостатком – хрупкостью связей. Обновление параметра в одном источнике может остаться не синхронизированным с зависимыми данными в другом. Подобные несоответствия, как правило, выявляются лишь на этапах сборки или испытаний, когда стоимость исправления становится ощутимой, а иногда и критичной.

В экосистеме MBSE логика работы с проектными данными принципиально меняется. Здесь информация формируется в виде целостной, жестко связанной структуры: изменение одного элемента автоматически отражается во всех зависимых представлениях и объектах. Однако ключевое преимущество подхода заключается даже не в этом, а в возможности многократного использования данных модели на разных стадиях жизненного цикла изделия. Цифровая модель становится единым достоверным источником информации для проведения начальных расчетов и симуляций в различных программных средах. Это позволяет выполнять исследования, верификацию и виртуальные испытания задолго до создания физического прототипа. Таким образом стоимость ошибок снижается, а цикл разработки ускоряется.

В то же время MBSE – не универсальная «волшебная кнопка». Модель, призванная управлять сложностью изделия, сама может превратиться в фактор риска. В высокотехнологичных отраслях, например в аэрокосмической промышленности, где количество требований измеряется десятками тысяч, возникает опасность избыточной детализации и неконтролируемого роста структуры. Перегруженная модель становится громоздкой, теряет управляемость и начинает замедлять процессы вместо их оптимизации.

Решающим фактором успешного внедрения становится организационная дисциплина: управленческие и инженерные решения должны приниматься на основе модели, а не существовать параллельно с ней. Если модель создается формально, а реальные договоренности остаются в электронной переписке или в неструктурированных знаниях команды, нагрузка на инженерный состав многократно возрастает. В результате формируются красивые, но изолированные диаграммы, не интегрированные с CAD/CAE-средствами и системами управления требованиями. В таком случае модель превращается в автономный артефакт – дорогостоящий инструмент, не создающий ценности для бизнеса.

В российской профессиональной среде разборы успехов и практических кейсов внедрения MBSE пока редки. В международной отраслевой и академической прессе, напротив, накоплена масса публикаций, демонстрирующих прикладной эффект модельно-ориентированного подхода.

Так, при разработке Boeing 787 применение MBSE позволило выявлять проблемы интеграции подсистем на ранних стадиях проекта и устранять их до возникновения дорогостоящих задержек. В миссии LADEE агентства NASA моделирование требований и программного обеспечения в сочетании с ранними испытаниями HiL/PII обеспечило ускоренную верификацию и снижение числа дефектов.

Отдельное внимание в исследованиях уделяется управлению требованиями. Показано, что модельные среды обеспечивают сквозную прослеживаемость требований на всём жизненном цикле системы и поддерживают автоматизацию процедур проверки. Это особенно важно для проектов с высокой степенью кооперации и распределенной ответственностью.

MBSE существенно расширяет возможности виртуального тестирования и верификации. Интеграция моделей с симуляцией обеспечивает «сдвиг влево» проверок, перенос ключевых процедур контроля качества на более ранние стадии разработки. Генерация кода из моделей и автоматизированный анализ позволяют выявлять ошибки ещё до изготовления прототипа.

В аэрокосмических проектах, включая SidSat, применение усовершенствованных архитектурных моделей позволило повысить уровень ранней валидации и снизить риск расхождений между логикой системы и результатами симуляции. Модельно-ориентированный подход также облегчает соответствие строгим авиационным стандартам сертификации, формализуя процессы доказательства корректности.

В автомобильной промышленности внедрение MBSE ускоряется вслед за ростом сложности электроники и автономных функций. В частности, в General Motors модельный подход использовался для координации разработки аппаратных и программных компонентов систем ADAS и обеспечения соответствия требованиям безопасности и функциональности. Сквозная прослеживаемость требований становится критически важной для соблюдения стандартов функциональной безопасности, а единая модель проектирования обеспечивает раннее выявление ошибок взаимодействия между электронными и программными компонентами.

Дополнительный эффект – расширение возможностей виртуальных испытаний. Инженеры могут

моделировать взаимодействие сенсоров, алгоритмов и окружающей среды и тестировать сложные сценарии в цифровой среде до создания физического прототипа. Это сокращает число натурных испытаний, уменьшает количество итераций проектирования и ускоряет вывод продукта на рынок.

В совокупности международная практика подтверждает: при грамотной интеграции MBSE становится инструментом системного управления сложностью, снижая риски, затраты и временные издержки на протяжении всего жизненного цикла изделия.

В России наибольшая практическая активность вокруг модельно-ориентированного системного проектирования сосредоточена в высокотехнологичных секторах, прежде всего в авиационной и космической промышленности. По экспертным оценкам именно здесь MBSE применяется уже на самых ранних стадиях жизненного цикла сложных изделий – при формировании требований и архитектуры систем. Существенным драйвером интереса стали международные отраслевые стандарты и государственные программы цифровой трансформации промышленности.

В авиастроении модельный подход используется в проектах новых самолётов и двигателей. Например, на базе методологии ARCADIA и инструмента Capella, применяемых для построения архитектур систем, специалисты корпорации «Иркут» совместно с научными организациями сформировали новую методику инженерного анализа.

Объединенная авиастроительная корпорация системно продвигает модельно-ориентированное проектирование на уровне конструкторских бюро. На научно-технических форумах корпорации регулярно обсуждаются цифровые двойники, визуализация инженерных данных и методы обмена проектной информацией. Параллельно реализуется проект создания единой информационной среды управления жизненным

циклом изделий на основе принципов системной инженерии.

Наряду с современными архитектурными методологиями применяются и классические подходы: V-модель разработки, язык SysML и распространенные инструментальные среды системного моделирования. При этом российские разработчики делают акцент на интеграции MBSE с локальными САПР- и PLM-решениями. Так, отечественные комплексы «КОМПАС-3D+Лоцман:PLM» и T-FLEX PLM уже включают функции трассировки требований и архитектурного проектирования.

В космической отрасли динамика сходная: флагманские предприятия применяют те же методологические основы и инструментальные платформы, что и авиационные разработчики, включая ARCADIA/Capella и SysML-ориентированные среды. Параллельно проводятся специализированные семинары по цифровым двойникам ракетно-космической техники, где MBSE рассматривается как ключевой механизм управления сложностью проектов.

В автомобилестроении внедрение происходит более степенно, однако появляются показательные пилотные проекты. Для создания перспективных образцов используются технологии цифровых двойников и сквозного цифрового проектирования CAD/CAE/MBSE, что позволяет создать транспортное средство «с нуля» в полностью цифровой инженерной среде.

Исторически российские предприятия опирались преимущественно на зарубежные инструменты системного моделирования и PLM-платформы, однако в последние годы заметно усиливается роль отечественного программного обеспечения. Например, компания «Топ Системы» представляет платформу T-FLEX PLM как комплекс для управления продуктом на всех стадиях жизненного цикла, включая концепции системной инженерии и элементы MBSE.

В результате складывается характерная для российского рынка модель развития: сочетание международных методологий

системной инженерии с локальными цифровыми платформами. Такой гибридный подход позволяет адаптировать практики MBSE к требованиям импортонезависимости, национальных стандартов и государственной цифровой повестки.

Чтобы объективно оценить уровень развития модельно-ориентированной системной инженерии в России, недостаточно анализировать отдельные инструменты или программные продукты. Ключевым фактором становится зрелость всей экосистемы: связки PLM-платформ, сред системного моделирования и инженерных расчетных комплексов. Именно их интеграция формирует единое информационное пространство жизненного цикла изделия – от концепции до эксплуатации и утилизации.

Базовый слой экосистемы составляют PLM-решения, обеспечивающие хранение, управление конфигурацией и согласованность инженерных данных. В числе лидеров российского рынка – решения компаний АСКОН (ЛОЦМАН:PLM) и «Топ Системы» (T-FLEX PLM). Однако современный MBSE выходит далеко за рамки документооборота и управления структурами изделия: в центре внимания находится живая цифровая модель системы.

Расчетную и модельную основу такого подхода обеспечивают специализированные платформы:

- **CML-Bench®** – цифровая платформа, разработанная СПбПУ, ориентированная на автоматизацию инженерных вычислений и многовариантную оптимизацию. Она поддерживает сквозную трассировку требований и параметров изделия, связывая архитектурные решения с расчетными сценариями и результатами анализа.
- **Engee** – среда динамического междисциплинарного моделирования, поддерживающая модельно-ориентированное проектирование, генерацию кода и интеграцию с языками Python и Julia. Платформа позволяет работать с библиотеками блоков различной физической природы, объединяя

механику, электронику и программную логику в единой модели.

- **SimInTech** – инструмент динамического моделирования, применяемый при разработке систем управления и алгоритмов функционирования изделий. В контексте MBSE он обеспечивает раннюю верификацию поведения системы, связывая функциональные требования с математическими моделями.
- **APM, FlowVision и LOGOS** – отечественные CAE-решения для прочностного и гидрогазодинамического анализа. Их интеграция в MBSE-процесс замыкает цепочку «требование → архитектурная модель → расчет → подтверждение характеристик», формируя основу цифрового двойника.

Примером комплексной реализации может послужить архитектура решений АСКОН. В её основе лежит единая цифровая модель, объединяющая требования, функциональные структуры, логическую и физическую архитектуру изделия. Данные хранятся в общей информационной среде, что обеспечивает согласованность и управляемость изменений.

Практическая реализация MBSE строится вокруг подсистем управления требованиями и архитектурного проектирования. Требования формализуются, декомпозируются, версионизируются и связываются с элементами архитектуры, расчетными моделями и результатами испытаний. Поддерживается двусторонняя трассируемость: можно отследить, какие компоненты затрагивает конкретное требование, и наоборот – какие требования изменяются при корректировке модели.

Архитектурное проектирование часто опирается на методологию ARCADIA и структурные модели системы, описывающие функциональные блоки, интерфейсы, потоки данных и взаимодействие подсистем. Интеграция этих моделей с PLM-средой обеспечивает сквозную связь между системной архитектурой, CAD-структурой и расчетными представлениями изделия. Это позволяет синхронизировать изменения между

различными дисциплинами и минимизировать риски рассогласования данных.

Отдельное значение имеет интеграция расчетных модулей и средств верификации в единую инженерную среду. Расчетные сценарии, параметры и результаты становятся частью цифровой модели изделия и автоматически сопоставляются с требованиями. Такой подход формирует непрерывный цикл проверки соответствия и существенно ускоряет итерации проектирования.

Таким образом, MBSE в российской практике постепенно эволюционирует из набора разрозненных инструментов в комплексную технологическую платформу, объединяющую управление требованиями, архитектурное моделирование, инженерный анализ и конфигурационное управление. Речь уже идет не о пилотных инициативах, а о формировании зрелого технологического стека, способного поддерживать цифровую трансформацию промышленности.

Космическая отрасль и авиостроение в России демонстрируют наибольшую активность в освоении модельно-ориентированной инженерии: запускаются пилотные проекты, формируются кадровые компетенции, ведутся попытки адаптации международных стандартов, таких как CMMI и ISO/IEC/IEEE 15288. При этом внедрение MBSE носит фрагментарный характер, ограничиваясь отдельными предприятиями или коллективами. В некоторых секторах, например в энергетике, фокус смещён скорее на создание «цифровых двойников» для эксплуатации существующих объектов, чем на применение MBSE как методологии проектирования новых систем.

Развитие MBSE в России сталкивается с системными барьерами, которые можно разделить на три взаимосвязанных уровня:

1. **Технологический:** высокий порог входа из-за стоимости лицензий на специализированные инструменты, сложности интеграции с существующей IT-инфраструктурой и необходимости поддерживать

совместимость с унаследованными системами.

2. **Организационный:** отсутствие единых отраслевых стандартов, фрагментарность методологий и инерция корпоративной культуры. Главная задача – трансформация процессов от документоориентированной парадигмы к управлению на основе единого источника истины (Single Source of Truth).

3. **Компетенционный:** дефицит инженеров с практическим опытом применения MBSE. Этот разрыв усугубляется несоответствием академических программ реальным требованиям отрасли, а также ограниченным доступом к программам переподготовки и сертификации специалистов.

В отличие от международных лидеров, таких как Airbus или Министерство обороны США, где MBSE внедряется как императив выживания в условиях экстремальной сложности систем и жесткой конкуренции, российский переход остаётся инициативой «снизу» – без мощного государственного мандата и рыночного давления.

Для преодоления существующего разрыва необходима комплексная стратегия: разработка национальных стандартов, целевое финансирование отечественных инструментальных платформ, масштабные инвестиции в человеческий капитал и формирование отраслевых сообществ практиков. Без системного подхода локальные пилотные проекты рискуют остаться отдельными экспериментами, а российская промышленность – углубить отставание в цифровой зрелости.

В заключение стоит подчеркнуть, что MBSE постепенно переходит из академической концепции в отраслевой стандарт проектирования сложных систем. Для руководителя проекта ключевая ценность MBSE заключается в управлении растущей сложностью изделий и снижении рисков: модельный подход позволяет выявлять архитектурные ошибки на ранних этапах, сокращать затраты на исправление дефектов

и ускорять вывод продукта на рынок. Международные практические кейсы, такие как Boeing и проекты BMC США, демонстрируют возврат инвестиций (ROI) более 3:1 и снижение производственных издержек до 55%, что делает MBSE экономически обоснованной стратегической инвестицией в качество и предсказуемость проектов.

Стратегический потенциал MBSE раскрывается через интеграцию с PLM-системами и концепцией цифрового двойника. Объединение системной модели с управлением жизненным циклом создаёт «цифровой поток» – единый источник достоверных данных для всех участников проекта. Это устраняет разрозненность информации между отделами, обеспечивает сквозную трассируемость требований, автоматизацию верификации и создает базу для предиктивного обслуживания: данные с реальных изделий обогащают виртуальную модель, позволяя оптимизировать эксплуатацию, планировать сервисные услуги и открывать новые источники дохода.

Для успешного внедрения MBSE руководителю проекта важно рассматривать его не как отдельный IT-проект, а как часть комплексной цифровой трансформации компании. Ключевыми условиями успеха являются поддержка высшего руководства и инвестиции в обучение команды. Оптимальный путь – начать с пилотного проекта на конкретной задаче, чтобы продемонстрировать измеримую пользу и отработать внутренние процессы. При выборе инструментов следует отдавать предпочтение решениям с поддержкой открытых стандартов (SysML v2.0, OSLC) и возможностью интеграции с существующей PLM-инфраструктурой: это обеспечит масштабируемость и защитит инвестиции от технологического устаревания.

Так MBSE становится не просто методикой моделирования, а стратегическим инструментом повышения эффективности, прозрачности и предсказуемости сложных инженерных проектов. ■