



## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ИЗДЕЛИЙ

И.В. Малиновский, В.В. Банкрутенко (АО «ОКБМ Африкантов»)

Рассмотрены особенности и взаимосвязи тенденций развития цифровых технологий, компонентов интегрированной логистической поддержки жизненного цикла изделий и поддерживающих их систем. Приведен подход к оценке состояния поддерживающей системы для интегрированной логистической поддержки изделий АО «ОКБМ Африкантов». Приведена итоговая модель оценки текущего состояния системы конечно-элементного анализа для целей интегрированной логистической поддержки изделий.

Ключевые слова: интегрированная логистическая поддержка, оценка состояния информационной системы, оценка состояния системы конечно-элементного анализа, цифровой двойник.

Концепция единой цифровой стратегии Госкорпорации «Росатом» фокусируется на решении внутренних задач и разработке новых продуктов с эффективным использованием имеющихся заделов. Одним из основных заделов на предприятиях отрасли, конструирующих изделия атомного машиностроения, является внедрение технологии поддержки жизненного цикла изделий на базе PLM-систем. АО «ОКБМ Африкантов» было одним из первых предприятий отрасли, приступившим к внедрению данной технологии. К настоящему времени можно констатировать успешное внедрение в АО «ОКБМ Африкантов» технологии поддержки жизненного цикла изделий на базе PLM-системы IPS SEARCH ОДО «ИНТЕРМЕХ», интегрированной с подсистемами проектирования, инженерного анализа, технологической подготовки и изготовления изделий, а также с системой управления предприятием. В настоящее время сотрудники службы информационных технологий (ИТ) организации совместно со специалистами функциональных направлений приступили к этапу развития интегрированной логистической поддержки (ИЛП). Это один из важнейших этапов цифровизации, так как ИЛП по ГОСТ Р 53394<sup>1</sup> включает деятельность головного разработчика и других участников жизненного цикла (ЖЦ) изделия, осуществляемую с использованием управленческих, инженерных и информационных технологий и направленную на формирование системы технической эксплуатации (СТЭ) изделия, обеспечивающей эффективное использование изделия при приемлемой стоимости его ЖЦ<sup>2</sup>.

ИЛП реализуется посредством применения специализированных информационных технологий (ИТ) и соответствующих программно-методических средств.

Задачи ИЛП связаны с формированием и обеспечением эффективного функционирования элементов СТЭ изделия: систем технического обслуживания, диагностирования, текущего ремонта и обеспечения. Процесс проведения ИЛП требует знания проектных рисков<sup>3</sup>. Согласно указанному документу, для целей ИЛП целесообразно обратить внимание на следующие проектные риски:

- неисправность ИТ-систем;
- изменение ИТ-технологий;
- отсутствие регламента по обеспечению сохранности информации;
- отсутствие/несовершенство инструментов проектирования (программного обеспечения);
- отсутствие каталогов (3D-исходные данные, оборудование и материалы и т. п.).

Кратко рассмотрим, на что влияют эти риски, и как их предотвратить.

**Неисправность ИТ-систем.** В соответствии с концепцией поддержки ЖЦ изделий [1] вся деятельность, связанная с проектированием, анализом, технологической подготовкой и изготовлением изделий, а также функционирование системы управления предприятием осуществляется в едином информационном пространстве, в котором информация создается, преобразуется и передается в различные системы. Неисправность в любой из этих систем может оказать серьезное влия-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53394-2017. Интегрированная логистическая поддержка. Термины и определения. Введение. 01.07.2017. М.: Стандартинформ. 2017. 12 с.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 53393-2017. Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения. Взамен ГОСТ Р 53393-2009. Введение. 10.03.2017. М.: Стандартинформ. 2017. 2 с.

<sup>3</sup> Электронный классификатор проектных рисков. Приложение №1. Утвержден приказом Госкорпорации «Росатом» от 19.09.2018 № 1/1048-П.

ние на результаты работы в другой системе. Например, ошибки в системе проектирования приведут к ошибкам в системе анализа и при изготовлении.

*Изменения в ИТ-технологиях.* ИТ-технологии постоянно совершенствуются, и появляются новые версии их реализующих программных продуктов. Это требует, во-первых, финансовых затрат на техническую поддержку программных продуктов, во-вторых, организации перехода на новые версии программных продуктов, включая дополнительное обучение специалистов, организацию хранения созданных данных, а также возможно их конвертацию. В настоящее время появляется возможность реализации «частных облаков», через которые можно передавать, в том числе «закрытую» информацию для ее последующего оперативного использования.

*Отсутствие/несовершенство инструментов проектирования (программного обеспечения).* Очень важно оценить, насколько имеющееся программное обеспечение какого-то функционального направления способно решать поставленные задачи. Практически этому посвящена статья на примере оценки имеющихся на предприятии систем расчетного анализа для целей ИЛП.

*Отсутствие каталогов (3D-исходные данные, оборудование и материалы и т.п.).* Возможности современных систем управления данными об изделии — так называемых PDM-систем, входящих в PLM-системы, позволяют значительно уменьшить данный риск, но начинать эту работу надо сразу же в самом начале проекта. В проектах, для которых созданы архивы [2], каталоги следует добавлять (если они отсутствуют). Решение данной задачи также может оказаться полезным в случае «импортозамещения», когда уже в предыдущей системе управления данными решена задача каталогизации.

Это неполный перечень проектных рисков, но иные имеют меньшее влияния и не учитываются.

Остановимся более подробно на внедрении подсистемы инженерного анализа (CAE) системы ИЛП с учетом выше перечисленных рисков.

При проектировании сложных систем, к которым относятся изделия атомной отрасли и их элементы, например насосное оборудование, качество проведения различных видов анализа (прочностного, тепло-гидравлического, акустического) на этапе проектирования существенно зависит от используемого программного обеспечения. Сложность физических процессов, протекающих в том же насосном оборудовании, не говоря уже о процессах в активной зоне, требует адекватного описания комплекса различных моделей физических процессов и оборудования и дальнейшей его программной реализации. Поэтому начальной задачей специалистов направления ИТ является формирование соответствующего комплекта программного обеспечения, начиная с этапа проектирования изделия.

Рассмотрим пример оценки полноты использования имеющихся на предприятии систем конечно-элементного анализа (FEA-пакетов).

Модель оценки состояния комплексной системы анализа [3] построена в виде аддитивной свертки многоуровневой модели, что позволяет при программной реализации данной модели видеть каждый уровень.

Такая модель позволяет при дополнении разработанными показателями более низкого уровня корректнее и полнее определять значения характеристик и показателей вышестоящего уровня, а более высокое значение весового коэффициента указывает на больший вклад соответствующего показателя в аддитивной свертке показателю или группе показателей верхнего уровня. Таким образом, мы получаем более четкую модель оценки всех групп показателей верхнего уровня. Для более четкого понимания модели оценки приведем эту модель для конечно-элементного анализа механики деформированного состояния.

Показатели каждого нижестоящего уровня более четко раскрывают смысл и значение показателя более высокого уровня, а значение весового уровня тем больше, чем данный показатель имеет вклад в значение показателя более высокого уровня. Ниже приведены формулы оценки состояния ИЛП:

$$И = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_i, \text{ где } 0 \leq \alpha_i \leq 1 \text{ и } \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

$$I_i = \sum_{j=1}^{n_i} \beta_{ij} * I_{ij}, \text{ где } 0 \leq \beta_{ij} \leq 1 \text{ и } \sum_{j=1}^{n_i} \beta_{ij} = 1$$

$$I_{ij} = \sum_{l=1}^{n_{ijl}} \gamma_{ijl} * I_{ijl}, \text{ где } 0 \leq \gamma_{ijl} \leq 1 \text{ и } \sum_{l=1}^{n_{ijl}} \gamma_{ijl} = 1,$$

где И — значение общей оценки ИЛП,  $I_i$  — значения выше приведенных показателей высшего уровня,  $I_{ij}$  — значения показателей более низкого уровня по отношению к верхнему уровню  $\alpha_i$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\gamma_{ijl}$ , — весовые коэффициенты.

Оценку самых нижних значений проводят эксперты соответствующего направления ИЛП.

Методика использует многоуровневое деление необходимой функциональности ПО с определением набора показателей, каждый из которых может быть использован как инструмент для определения недостаточной эффективности применения ПО. Показатели могут быть свернуты в группы, или при необходимости может быть проведена декомпозиция для определения причин низкого значения любого показателя. В таблице приведена двухуровневая модель проведенной оценки состояния используемого программного обеспечения инженерного обоснования конструкций. Значения показателей указаны для задач, актуальных для АО «ОКБМ Африкантов» на настоящий момент. Оценка значений показателей и значений весовых коэффициентов проводилась с привлечением ведущего специалиста отдела прочности. В рассматриваемой статье оценка программных продуктов рассматривалась относительно лицензионных программных продуктов фирмы ANSYS для механики деформированного твердого тела. Начало приобретения — конец 1990 г. Выбор

Таблица. Модель оценки состояния используемого программного обеспечения инженерного обоснования конструкций АО «ОКБМ Африкантов»

Показатель	Значение
<b>Создание расчетной модели</b>	0,77
Упругие элементы	0,60
Точечные массы	0,90
Демпфирующие элементы	0,70
Стержни	0,90
Балки	0,80
Слоистые тонкие оболочки (Композиционные материалы)	0,70
2D плоские и осесимметричные задачи	0,90
3D твердотельные модели	0,90
Слоистые объемные тела (Композиционные материалы)	0,70
Граничные условия в бесконечности	0,80
Армирование	0,50
Техники сокращения размерности задач (ROM)	0,80
Метод подконструкций (суперэлементов)	0,80
<b>Возможности моделирования</b>	0,72
Линейный контакт	0,80
Нелинейный контакт	0,80
Шарниры	0,70
Точечная сварка	0,70
Рождение и смерть конечных элементов	0,70
Уплотнения	0,60
Локальное и адаптивное перестроение сетки	0,70
<b>Модели материалов</b>	0,60
Базовые линейные модели материалов (Линейные, базовые нелинейные модели материалов (Гиперупругость, пластичность, не зависящая от скорости деформации, изотропные модели, бетоны)	0,90
Расширенные нелинейные модели материалов	0,60
Зависимость от характеристик полей	0,00
Реакционноспособные материалы	0,60
Механика разрушения	0,80
<b>Прочностные расчеты</b>	0,82
Линейный статический	0,90
Нелинейный статически	0,90
Учет предварительного нагружения, Линейная пертурбация	0,80
Геометрические нелинейности	0,90
Статические расчеты после нестационарных	0,70
Океанические волновые нагрузки	0,70
<b>Мультирасчеты</b>	0,52
Субмоделирование (анализ зон)	0,70
Интерполяция данных	0,50
Трассировка	0,00
Импорт начального состояния	0,70
Многоэтапные 2D-3D расчеты	0,70
<b>Динамические расчеты</b>	0,51

Таблица. Модель оценки состояния используемого программного обеспечения инженерного обоснования конструкций АО «ОКБМ Африкантов» (продолжение)

Модальный	0,90
Модальный с предварительным нагружением	0,80
Модальный с учетом демпфирования/с несимметричной	0,70
Нестационарный — Метод суперпозиции	0,70
Гармонический — Метод суперпозиции	0,80
Гармонический — Полный метод	0,00
Спектральный	0,80
Анализ случайных колебаний	0,50
Эффект расстройки	0,00
Роторная динамика	0,70
Модальный акустический расчет	0,00
Гармонический акустический расчет	0,00
<b>Нелинейные нестационарные расчеты</b>	0,80
Нестационарные расчеты — Полный метод	0,80
Метод динамических подконструкций (CMS)	0,70
<b>Динамика с явным методом интегрирования</b>	0,44
Лагранжев решатель	0,00
Лагранжев решатель	0,90
Эйлеров решатель	0,80
Бессеточные методы	0,00
Взаимодействие жидкостей и твердых тел (FSI)	0,70
Масштабирование масс	0,80
Эрозия на основе различных критериев	0,00
Переопределение зон	0,00
Активация и деактивация деталей (многоэтапные расчеты)	0,70
<b>Анализ долговечности</b>	0,45
На основе уровней напряжений (Stress-Life)	0,80
На основе уровней деформаций (Strain-Life)	0,80
Критерий Dang Van	0,00
Коэффициенты запаса	0,90
Адгезионные связи	0,00
Рост трещин на основе механики напряжений	0,60
Термомеханическая усталость	0,60
Виброусталость	0,60
<b>Междисциплинарные расчеты</b>	0,20
<b>Прочие возможности</b>	0,77
Кастомизация на базе ANSYS Customization Suite (ACS)	0,80
Поддержка АСТ-расширений	0,80
Поддержка командных вставок	0,70
Подключение внешних расчетных кодов	0,70
<b>Высокопроизводительные вычисления</b>	0,85
Возможность изменения используемых ядер CPU	0,90
Распределенные вычисления на локальных рабочих станциях	0,90
Распределенные вычисления на кластере	0,90
Поддержка графических процессоров (GPU)	0,70

данных продуктов осуществлялся в то время с привлечением конечных пользователей, и данные программные продукты наиболее полно реализовали решение задач, стоящих перед организацией на тот момент времени по настоящее время. Жирным шрифтом отмечены показатели верхнего уровня. Эксперты испытатели оценивают показатели нижнего уровня, входящие в соответствующие показатели верхнего уровня. Значения показателей верхнего уровня рассчитываются по выше приведенным формулам. С целью более компактного представления некоторые показатели нижнего уровня в данной таблице не приводятся.

Как видно из таблицы, показатели используемого программного обеспечения имеют достаточно высокие значения, что говорит о правильности выбора комплекса программных средств для проведения расчетного анализа на этапе проектирования и создания изделия.

В зависимости от конкретных решаемых задач, глубины внедрения смежных цифровых технологий и иных факторов оценка будет изменяться, поэтому мониторинг изменения показателей должен проводиться регулярно. Важно, что по методике<sup>4</sup> может проводиться и проводится оценка состояния изделий, экземпляров изделий [5], а также любых подсистем, обеспечивающих качество и повышение эффективности управления ЖЦ изделий. Методика основана также на аддитивной свертке, но уровни уже содержат другие функциональные характеристики.

Одна из главных задач ИЛП — снижение стоимости ЖЦ эксплуатации изделия и повышение степени его готовности. Развитие цифровых технологий породило понятие «цифровых двойников».

Цифровой двойник изделия является основой интеллектуальной системы эксплуатации изделия, ос-

<sup>4</sup> МУ -2018. Методические указания по проведению оценки логистической поддержки изделий АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ». Нижний Новгород. АО «ОКБМ Африкантов». 2018.

нованной на численном моделировании и аналитике объективных данных об изделии и его эксплуатации [4].

Преимущества использования цифрового двойника изделия:

- снижение операционных затрат благодаря мониторингу в режиме реального времени —  $\leq 30\%$ ;
- сокращение незапланированных простоев благодаря предиктивной аналитике оборудования —  $\leq 50\%$ ;
- сокращение числа аварий благодаря проактивному контролю отклонений —  $> 50\%$ ;
- увеличение ресурса и обоснованное продление сроков эксплуатации —  $> 10\%$ » [4];
- сокращение запасов ЗИП и сроков поставки ЗИП в случае необходимости — 10...60%.

Появление и развитие цифрового двойника изделия связано с развитием промышленного Internet вещей. В случае эксплуатации изделий, выпускаемых АО «ОКБМ Африкантов», применимы следующие функциональные возможности промышленного Internet вещей:

- выпускаемые изделия подключаются к локальным сетям [4];
- сбор данных о состоянии изделия в ходе его эксплуатации;
- разработка узкоспециальных приложений и интеграция их в работу предприятия.

Появившаяся возможность использования в «цифровом двойнике» выпускаемого оборудования актуальных данных о реальном изделии позволяет организовать оптимальную работу по плановым ремонтам или заблаговременной замене отдельных элементов оборудования в процессе эксплуатации. Данное направление стремительно развивается. Так, в начале внедрения данного направления в качестве «цифрового двойника», как правило, рассматривались более упрощенные

системы, дающие решение в оперативное время. В настоящее время, если нет необходимости в оперативном принятии решения, а важна более глубокая проработка проблемы на перспективу, то используются полнофункциональные системы, например, ANSYS. Таким образом, важной задачей является периодический анализ и оценка состояния программных продуктов и цифровых технологий, используемых при проведении анализа состояния различных объектов, находящихся в эксплуатации. Это, прежде всего, связано как с совершенствованием отечественного программного обеспечения в условиях импортозамещения, так и развитием зарубежного ПО.

#### Список литературы

1. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. М.:ООО Издательский дом «МВМ». 2003. 264с.
2. Петрунин В.В., Неевин С.М., Душев С.А. и др. Система логистической поддержки изделий РУ. Разработка методов и технологий для повышения ее эффективности//Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып. 52. Н. Новгород. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». 2017. 40-46 с.
3. Болодурин И.П., Тарасова Т.Н., Арапова О.С. Системный анализ. Уч. пособие. Оренбург: ОГУ. 2013. 193 с.
4. Крылов А.Н. Промышленный Internet вещей и технологии создания гибридных цифровых двойников. Стратегическое партнерство компаний ANSYS и PTC // XV конференция пользователей CADFEM/ANSYS. Москва. 2018.
5. Малиновский И.В. Анализ и практическая применимость оценки состояния интегрированной логистической поддержки изделий на основе современных требований//Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева». 2019. № 1 (124).

**Банкрутенко Владимир Викторович** — главный специалист,

**Малиновский Илья Владимирович** — начальник отдела управления ИТ-активами АО «ОКБМ Африкантов».

Контактный телефон (831) 241-87-70.

[bankrutenko@okbm.nnov.ru](mailto:bankrutenko@okbm.nnov.ru)

#### «Инфосистемы Джет» построила Data Lake для НЛМК

Эксперты «Инфосистемы Джет» разработали для мирового лидера сталелитейной промышленности систему анализа данных и моделирования, которая отвечает за доступность и качество данных, а также предоставляет инструментарий для вычислений и анализа. Внедренная система уже сейчас позволяет группе НЛМК эффективнее вести разработку цифровых сервисов и моделей машинного обучения для оптимизации производственных процессов.

В цехах и на агрегатах предприятия эксплуатируются десятки систем, которые накапливают и обрабатывают информацию о производственных и технологических процессах. Кроме того, в помещениях установлены десятки тысяч датчиков, которые непрерывно собирают и передают данные. Подразделению Data Science НЛМК требовался удобный инструмент для работы с получаемыми данными под разрабатываемые модели машинного обучения.

Для решения задачи Центр программных решений ИТ-компании «Инфосистемы Джет» совместно с командой НЛМК создали Data Lake емкостью 300 терабайт на базе отечественного дистрибутива распределенной платформы хранения Hadoop. Для решения задач сбора, передачи, трансформации и накопления данных были использованы

такие сервисы, как Apache Kafka, Apache NiFi, Apache Hive.

В рамках проекта специалисты запустили регулярную загрузку данных в Data Lake из более чем 70 источников (датчиков, а также MES и АСУТП), загрузили исторические данные за последние несколько лет работы предприятия и разработали карты данных технологических и производственных процессов отдельных цехов.

В рамках проекта команда «Инфосистемы Джет» разработала для НЛМК модель унифицированной витрины данных, а также процессы загрузки в нее, реализовала управление метаданными средствами Apache Atlas (тэгирирование, поиск и т.д.), настроила централизованную ролевую модель и ее интеграцию с Active Directory. Это дало возможность НЛМК оперативнее получать в Data Lake доступ к нужным им данным.

Для контроля работы Data Lake был также настроен комплексный мониторинг состояния сервисов системы в Zabbix, а также разработаны автотесты для контроля целостности и полноты данных. Для особо важных и уязвимых данных была создана возможность резервного копирования: то есть, в случае непреднамеренного уничтожения данных пользователем их можно будет восстановить.

[Http://www.jet.su](http://www.jet.su)