

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

И.Н. Куликов (ООО «ХЕКСА»)

Показаны преимущества и недостатки основных вариантов технического обслуживания промышленного объекта с фокусом на прогнозное обслуживание. Представлена методика проведения такого обслуживания, разработанная специалистами ООО «ХЕКСА». Показано, как с помощью цифровых двойников и анализа ретроспективных данных на их основе можно не только определить ресурс объекта, но и причины возникновения отклонений, снижающих его ресурс. Обозначена важность не только построения пространственной геометрии объекта, но и моделирование процесса сборки объекта, что позволяет говорить о появлении отклонений на всех этапах производства объекта. На примере исследования трещинообразования и изломов бандажей электровозов показана эффективность разработанной методики прогнозирования ресурса объекта как в части определения максимального числа циклов до разрушения, так и в части выявления источника напряжений, снижающего ресурс объекта.

Ключевые слова: 3D моделирование, цифровой двойник, прогнозирование, метод конечных элементов, железнодорожное колесо.

Любые инженерные объекты со временем подвержены разрушению, будь то промышленное оборудование, например, компрессоры, насосы или более сложные комплексы — ветряные станции, плотины или нефтяные платформы. Такие объекты, являясь основными средствами предприятия, требуют постоянного мониторинга. Для поддержания их работоспособности необходимо проводить соответствующее обслуживание.

Существует несколько основных типов обслуживания — реактивное, по регламенту и прогнозное [1, 2, 3].

Наиболее распространенный вариант обслуживания — обслуживание по регламенту, когда ремонт или профилактика происходят циклически через равные промежутки времени или ресурса машины. Недостаток данного типа заключается в преждевременном ремонте, а именно: ремонт (обслуживание) проводится, когда машина еще в рабочем состоянии.

Наименее эффективный, но не менее распространенный вариант обслуживания — реактивный, когда ремонт производится непосредственно после поломки. Недостаток данного типа обслуживания — он происходит внезапно, зачастую вызывая длительные простои оборудования из-за таких факторов, как отсутствие запасных частей, специалистов, которые могут отремонтировать объект.

Прогнозное обслуживание нивелирует все перечисленные недостатки. Этот вид обслуживания является оптимальным, ввиду возможности заранее: 1) планировать точное время выхода из строя объекта, что позволяет максимально использовать полезную работу оборудования, планировать оптимальное время проведения обслуживающих работ; 2) рассчитывать стоимость возможного ремонта, заранее построить цепочку поставок запасных частей таким образом, чтобы минимизировать потери от внепланового ремонта.

Самая популярная методика прогнозирования на сегодняшний день основана на статистической обработке данных, получаемых от многочисленных датчиков, с помощью алгоритмов искусственного интеллекта. Выделим основные недостатки данного подхода, которые снижают общую точность прогнозирования (табл. 1).

Таблица 1. Недостатки прогнозирования на основе статистической обработки данных

Наименование	Комментарий
Представление физического объекта	В виде «черного ящика»
Учет конструктивных особенностей и несовершенств	Не учитываются
Осуществление прогноза	На основании исторических данных
Точность	Зависит от обученности модели и объема данных

Самым важным и неисправимым недостатком статистических методов является невозможность проанализировать динамику взаимодействия объекта с окружающей средой. То есть алгоритмы искусственного интеллекта или машинного обучения не смогут выявить причину появляющихся отклонений, они лишь фиксируют такие отклонения и сигнализируют о них.

Для ухода от понятия «черный ящик» и возможности проведения виртуальных испытаний объекта и его поведения с учетом окружающей среды в будущем необходимо использовать концепцию цифровых двойников. Цифровой двойник — математическая модель реального объекта, которая обладает всеми его характеристиками в реальном времени. С помощью цифровых двойников можно проводить цифровые испытания (которые гораздо дешевле натуральных) объекта практически с любыми сценариями.

В настоящее время на крупных объектах (здания, мосты, плотины, нефтяные платформы и т.д.) существует ряд проблем с определением как текущего состояния объекта, так и его прогнозного состояния. Поскольку оценить достоверность данных контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), внедренной на объекте, за долгое время эксплуатации объекта не представляется возможным, а также поскольку к настоящему времени большинство КИА, срок эксплуатации которых составляет по несколько десятилетий, возможно, вышло из строя, то на помощь приходят цифровые двойники. Использование математических моделей позволит верифицировать систему КИА и дополнить ее прогнозной составляющей реального состояния объекта при модернизации систем эксплуата-



Рис. 1. Алгоритм построения ретроспективных моделей объектов

ционного приборного контроля за счет использования расчетных моделей и геодезической КИА (обладающей свойствами ремонтпригодности, восполняемости, поверяемости) для восполнения недостающих данных о параметрах состояния объектов.

Таким образом, контроль состояния объектов на различных этапах жизненного цикла, в том числе на этапе длительной эксплуатации, реализуется путем осуществления эксплуатационного мониторинга объектов, обеспечивающего оценку их текущего состояния, а также прогноза их технического состояния с помощью цифровых двойников. Данный подход обеспечивает основу для принятия своевременных решений по объему и срокам проведения работ по текущему обслуживанию и ремонту объектов.

Для решения этих проблем разработана методика, позволяющая максимально точно строить ретроспективные модели объектов, которая состоит из следующих шагов (рис. 1).

1. Подготовительный блок. Составление карты расчетов.

2. Подготовительный блок. Построение номинальной модели (по рабочей документации) объекта
 а. создание 3D модели,

б. создание конечно-элементной модели для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС),
 с. поиск реперных точек для установки контрольно-измерительной аппаратуры.

3. Подготовительный блок. После окончания построения — проверка и тестирование модели, элиминация человеческого фактора.

4. Подготовительный блок. Приведение номинальной модели к состоянию реального объекта. Экспертиза объекта на соответствие его рабочей документации. Анализ (при наличии) исторических данных.

5. Основной блок I. Проведение сценарных анализов (моделирование процессов функционирования объекта при различных условиях эксплуатации) в соответствии с картой расчетов для исследования влияния эксплуатационных режимов на состояние сооружения на этапе длительной эксплуатации

6. Основной блок II. Формирование тарифовочных данных для последующего мониторинга и оценки рисков (матрица рисков) и уровней безопасности сооружения на этапе длительной эксплуатации.

7. Основной блок III. Внедрение системы мониторинга для наблюдения и съема информации для актуализации данных.

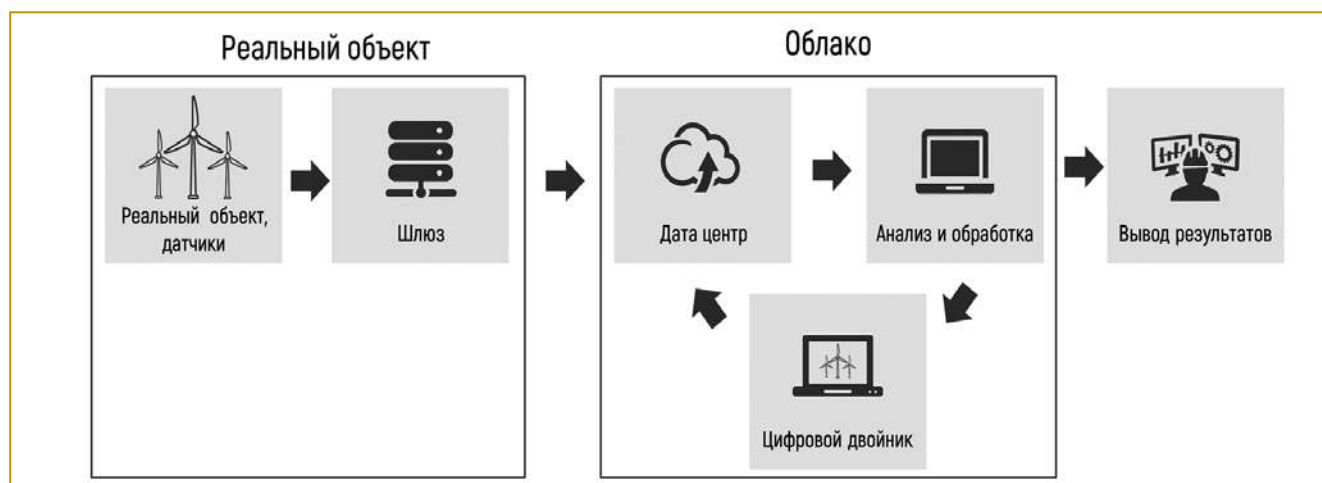


Рис. 2. Архитектура решения

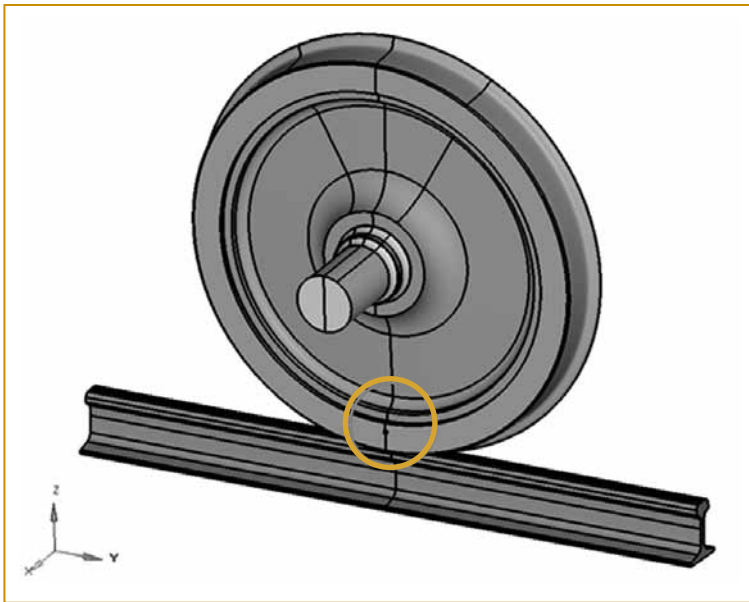


Рис. 3. Пространственная геометрия сборки колеса с рельсом

Таблица 2. Выбранные размеры для обеспечения максимальных посадок (мм)

		2ЭС6	2ЭС10
Посадка бандажа	Бандаж	1068,35	1068,35
	Колесный центр (большой)	1070,0	1070,0
	Посадка	1,65	1,65
Посадка на ось	Колесный центр (малый)	236,1	242,0
	Ось	236,33	242,33
	Посадка	0,32	0,33

Изначально выбирается исследуемый объект, анализируется и строится его 3D модель. Затем строится расчетная модель для проведения сценарных экспериментов и определения реперных точек. Данные точки необходимо определять для того, чтобы впоследствии внедрять в эти точки датчики, данные с которых позволяют описывать поведение объекта в любое время. На основе полученных от датчиков данных и после их обработки с помощью алгоритмов искусственного интеллекта появляется возможность прогнозировать поведение объекта на горизонте времени. Важным этапом является верификация модели — соответствие модели реальному физическому объекту и ее валидация — исключение ошибок, вызванных человеческим фактором.

Архитектура решения представлена на рис. 2.

Установленные в реперных точках датчики передают данные через объединительную шину в шлюз, где шифруются и передаются далее по защищенному каналу в облако. В облаке расположен цифровой двойник, в котором проводятся необходимые расчеты параметров объекта и аналитика. На основании обработанных данных осуществляется мониторинг текущего состояния объекта и его прогнозирование.

Рассмотрим пример. После перехода на использование электровозов модели 2ЭС10 совместно с моделью 2ЭС6 и внедрения связанных с этим изменений в конструкции колеса электровоза, способах сборки и управления рабочим моментом на колесной оси появились случаи трещинообразования в бандаже колеса. Трещинообразование и изломы бандажей электровоза 2ЭС10 происходят в зоне клеймения.

Система прогнозирования на базе алгоритмов искусственного интеллекта позволила определить, что ресурс бандажей мог варьироваться в диапазоне 3×10^{13} ... $7,5 \times 10^{13}$ циклов. Система зафиксировала факт неисправности, но не определила ее причину.

С помощью цифрового двойника, напротив, можно определить множество параметров, которые позволяют сделать вывод о концентраторах напряжений и, как следствие, истинной причине отклонений. При этом недостаточно построить пространственную геометрию объекта, важно учесть даже такие нюансы, как, например, сборка.

Рассмотрим далее процесс построения цифрового двойника и его анализ.

Конструкция колесной пары состоит из четырех деталей: оси, колесного центра, бандажа и бандажного кольца. Колесный центр (диск) устанавливается на ось с натягом, бандаж устанавливается на колес-

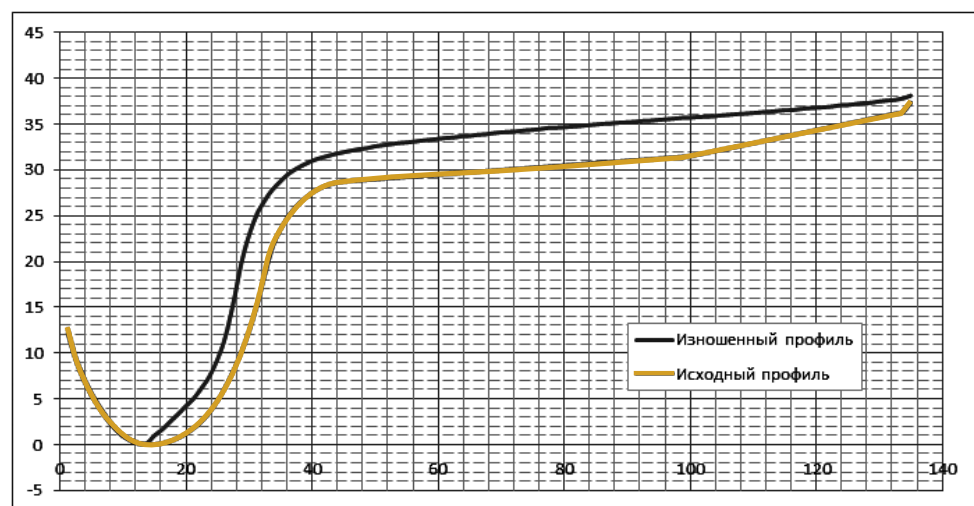


Рис. 4. Изношенный профиль колеса, построенный по результатам измерения профилометра

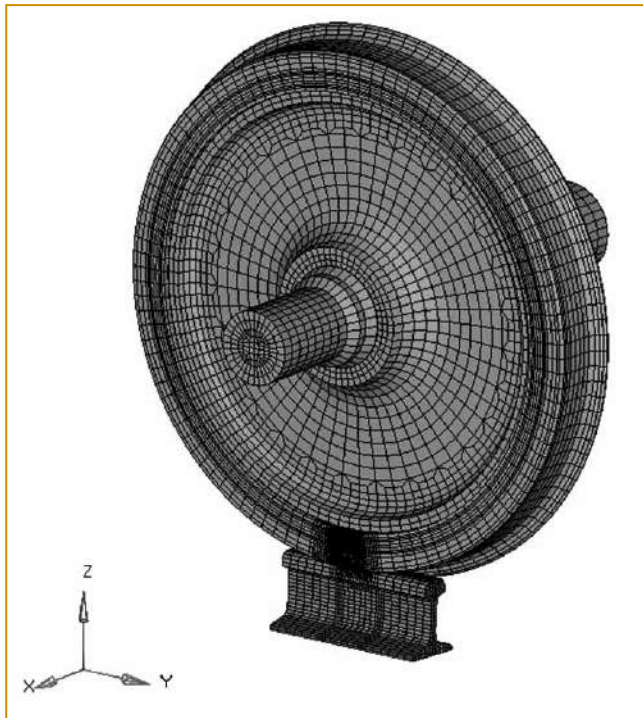


Рис. 5. Расчетная модель. Общий вид



Рис. 6. Вид образца на трехточечный изгиб: слева – образец с концентратором в виде клейма; справа – образец с нанесенным концентратором, повторяющим профиль сечения клейма

ный центр также с натягом, бандажное кольцо фиксирует сборку «бандаж-колесный центр» в осевом направлении. Оработана методика расчета процесса сборки колес с учетом посадки посредством температурного расширения.

Поверхности посадок бандажа на колесный центр и колесного центра на ось выполнены с учетом максимальных посадок по чертежам, то есть отверстия по минимальному размеру, а валы по максимальному размеру с учетом допусков.

Расчет для каждого варианта колеса проводится по следующей схеме.

1. Моделирование сборки колеса (две различные последовательности сборки в зависимости от модели колеса) с учетом температурных посадок. Расчет монтажных напряжений.
2. Добавление вертикального осевого усилия 125 кН при контакте колеса с рельсом.
3. Добавление крутящего момента 29,4 кНм (для 2ЭС6) или 30,6 кНм (для 2ЭС10) на одно колесо.
4. Снятие силы и момента.
5. Поворот колеса на 45 гр.
6. Приложение силы и момента к колесу в новом положении.

7. Повторение п. п. 4–6 для восьми положений колеса — один оборот.

8. Вычисление минимальных и максимальных напряжений за один оборот колеса.

9. Моделирование условий роста трещины для определения момента начала роста трещины (ресурса колеса) в зоне концентратора от воздействия указанных выше сил и моментов.

На рис. 3 показана пространственная геометрия сборки колеса с рельсом и выделено место клеймения. В качестве концентратора напряжений была выбрана цифра «0» клеймения, имеющая максимальные по ГОСТ 398-2010 размеры, габаритами 15x10 мм и глубиной 3 мм.

Поверхности посадок бандажа на колесный центр и колесного центра на ось выполнены с учетом максимальных посадок по чертежам заказчика, то есть отверстия по минимальному размеру, а валы по максимальному размеру с учетом допусков (табл. 2).

Моделирование температурных посадок производилось при помощи задания математических условий в контакте двух сопрягаемых деталей в отдельном шаге нагружения. Обработка изменившейся посадочной поверхности моделировалась математическим смещением узлов деформированной конечноэлементной сетки к необходимому положению согласно чертежу.

Профиль изношенного колеса для всех вариантов выбран один и взят из результатов показаний профилометра для колеса, которое лопнуло (рис. 4).

Построена расчетная модель, в которой максимальное внимание уделялось зоне максимальных напряжений (рис. 5).

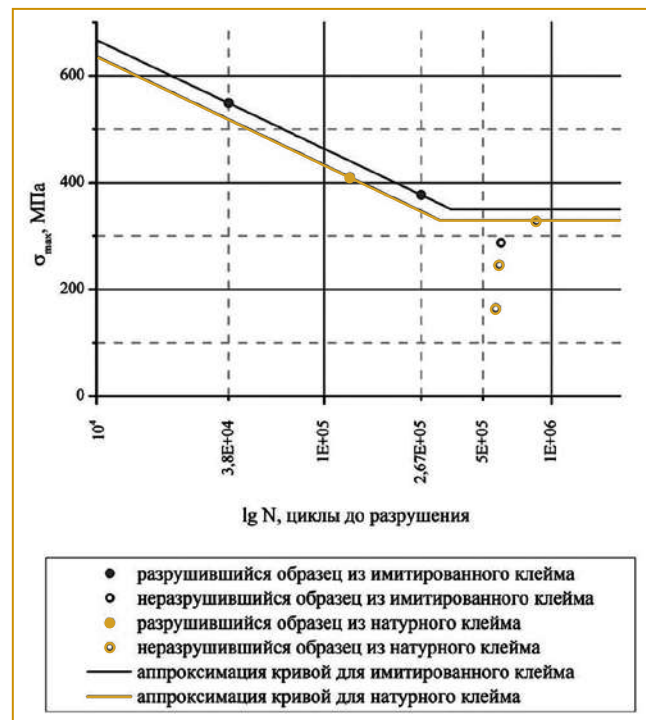


Рис. 7. Кривые усталости для образцов с концентратором напряжений

Таблица 3. Механические свойства стали бандажа №58226 плавки № 27651

	σ_b , Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	$\sigma_{0,2} / \sigma_b$	δ , %	Ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²	
						при 20 °С	при -60 °С
Результат испытаний бандажа №58226	1165	755	0,65	13	36	28	24



Рис. 8. Число циклов нагружения до начала роста трещины в зоне концентратора

Механические свойства (табл. 3) и усталостная прочность (рис. 6, 7) стали бандажа получены из экспериментов по ГОСТ 398-2010 (табл. 3).

На основе полученных в расчетах за один оборот колеса максимальных и минимальных напряжений, образующихся в зоне концентратора, проведено моделирование роста трещины в зоне концентратора для определения момента начала трещинообразования, что является ресурсом детали при заданных нагрузках.

Число циклов (ресурс) нагружения до начала роста трещины в колесах 2ЭС6 и 2ЭС10 практически идентичны при одинаковой нагрузке (рис. 8). Старое колесо 2ЭС6 с литым центром имеет в 2,1 раза больший ресурс, чем новое колесо 2ЭС6 с катаным центром.

А отсутствие концентратора на колесе повышает его ресурс на семь порядков, что практически исключает вероятность появления поперечной трещины при исследованных нагрузках.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что исключение концентратора из бандажа колеса или его минимизация — это наиболее логичный и эффективный способ увеличения долговечности любых моделей локомотивных колес.

Таким образом, можно видеть, что использование методики прогнозирования на базе цифрового двойника не только позволяет точнее рассчитывать ресурс объектов, но и выявлять причины появления отклонений, снижающих этот ресурс.

Список литературы

1. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Боган А.Н. и др. Мониторинг состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях // Вестник УГАТУ. 2013. №8 (61). С. 56 - 62.
2. Кольцов А.Г. Диагностика технического состояния металлорежущего оборудования // Омский научный вестник. 2011. №. 3 (103). С. 79 - 82.
3. Ковалев А.В., Трушин Н.Н., Сальников В.С. Прогнозирование технического состояния технологического оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 11: в 2 ч. Ч. 2. С. 554 - 560.

Куликов Игорь Николаевич — канд. техн. наук, ООО «ХЕКСА».
E-mail: ik@hexa.ru

RAMAX GROUP автоматизировал мониторинг реализации программы инновационного развития для группы «Аэрофлот»

Специалисты российского системного интегратора «РАМАКС Интернейшнл» (входит в RAMAX GROUP) завершили проект внедрения автоматизированного решения по мониторингу реализации Программы инновационного развития (ПИР) в компаниях группы «Аэрофлот».

Это абсолютно новое технологическое решение в области автоматизации мониторинга исполнения ПИР, не имеющее аналогов на российском рынке. Оно позволяет оптимизировать трудозатраты на подготовку среднесрочного плана реализации и отчетности выполнения ПИР, время на сбор и верификацию данных, а также обеспечивает централизованный сбор и хранение информации.

В начале 2019 г., на старте работ по проекту перед командой консультантов были поставлены масштабные задачи по созданию полноценного рабочего места сотрудников группы сопровождения ПИР ПАО «Аэрофлот» и дочерних обществ - АО «Авиакомпания «Россия» и АО «Авиакомпания «Аврора». В рамках проекта

специалисты «РАМАКС Интернейшнл» разработали модуль автоматизированного сбора, верификации, консолидации и подготовки данных для формирования среднесрочного плана ПИР и модуль подготовки отчетности об исполнении ПИР и расширенной оперативной отчетности по группе Аэрофлот.

Решение было успешно интегрировано с системой оперативного учета, производственными системами, системой планирования и бюджетирования. Учитывая тот факт, что существенная часть ИТ-инфраструктуры «Аэрофлота» реализована на базе решений конкретных вендоров, в архитектуре были использованы возможности уже эксплуатируемых заказчиком продуктов. Это максимально позитивно сказалось на интеграции и настройке системы мониторинга ПИР в разрезе сроков работ и адаптации ее в ИТ-ландшафте группы «Аэрофлот».

В настоящее время работы завершены, решение принято заказчиком в промышленную эксплуатацию.

[Http://www.ramax.ru](http://www.ramax.ru)