

Разработка цифрового двойника для управления и диагностики процессом транспорта газа

Ю. А. Кораблев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

juri.korablev@gmail.com

Аннотация. Технология «цифрового двойника» хорошо вписывается в идеологию построения интеллектуальных отказоустойчивых систем управления. В основе технологии – предпосылка, что для каждой системы можно создать представление в виде двух систем – физической и виртуальной, включающей всю информацию о физической системе. При этом происходит постоянное «зеркальное отображение»: виртуальная система «отображает» реальную, и наоборот. Основой цифрового двойника в данном докладе является SIMULINK-модель технической системы, актуализируемая данными, получаемыми от реального объекта. При моделировании на основе SIMULINK-модели параллельно с работой реального объекта решаются задачи диагностики и обеспечения отказоустойчивости. Результаты решения этих задач – диагнозы неисправностей и параметры реконфигурации/реструктуризации регуляторов – передаются из виртуальной среды цифрового двойника реальному объекту. Еще одной важной задачей, решаемой в рамках технологии «цифрового двойника», является прогнозирование. В контексте данной работы речь идет о решении задачи прогнозирования возникновения неисправностей. Для прогнозирования возникновения неисправностей и соответственно раннего обнаружения потенциального отказа оборудования необходимо рассчитать в режиме реального времени функцию деградации характеристик оборудования, определить и скорректировать остаточный ресурс. В результате возникает резерв времени для выполнения работ по ремонту и техническому обслуживанию с минимумом затрат и без простоев.

Ключевые слова: цифровой двойник; диагностика; отказоустойчивость; неисправности; прогнозирование возникновения неисправностей; SIMULINK-модель

I. КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Технология «цифрового двойника» хорошо вписывается в идеологию построения интеллектуальных отказоустойчивых систем управления [1].

Одним из авторов концепции цифрового двойника является профессор Майкл Гривс (Michael Grieves) [2], интерпретация которой развивается со временем.

В основе концепции – предпосылка, что для каждой системы можно создать представление в виде двух систем – физической и виртуальной, включающей всю информацию о физической системе. При этом происходит постоянное «зеркальное отображение»: виртуальная система «отображает» реальную, и наоборот (рис. 1).



Реальное пространство Цифровое пространство

Рис. 1. Основа концепции цифровых двойников Майкла Гривса

Время возникновения концепции цифрового двойника – начало 2000-х гг. В начале применения она не получила из-за своей сложности и высокой стоимости. Следующий временной период, период радикального изменения – 2010-х гг. Благодаря усилению роли и важности задач проектирования, стремительному развитию технологий поддержки проектирования, таких как компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг, интернет вещей, машинное обучение, Big Data, искусственный интеллект цифровые двойники стали претендовать на ключевую роль в IV промышленной революции (рис. 2).

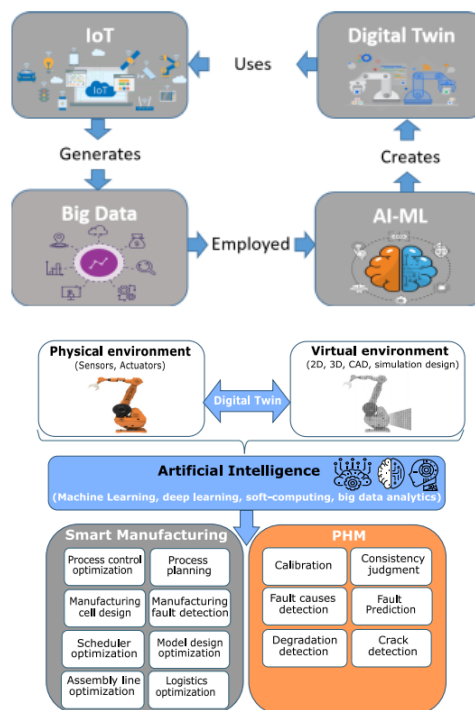


Рис. 2. Связь между интернетом вещей, большими данными, искусственным интеллектом, машинным обучением и цифровыми двойниками

Для обозначения «Цифрового двойника» часто используют родственные понятия типа «Цифровая тень», «Цифровая модель». При этом фундаментальной особенностью цифрового двойника является оптимизация эффективности технической системы на основе оперирования актуальными данными, получаемыми с реального объекта. Эти данные получают и анализируют в ходе измерений параметров технической системы в реальном мире.

Уровень развития «Цифрового двойника» принято отражать так называемой пирамидой цифровизации (рис. 3).



Рис. 3. Пирамида зрелости цифровизации

Название «цифровой двойник» Майкл Гривс (соавтор термина – эксперт NASA Джона Викерса (John Vickers)) первый раз использовал в книге «Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management» (2011 год).

«Цифровые двойники» в настоящее время рассматриваются как часть концепции Индустрия 4.0 [3], основное их назначение – моделирование технических систем в виртуальной среде.

II. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ СИСТЕМА ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТА ГАЗА

В рамках данной работы разработанная интеллектуальная отказоустойчивая система процесс транспорта газа [4], все предлагаемые типовые решения задач диагностики и обеспечения отказоустойчивости на разных уровнях иерархии модели технической системы в соответствии с ее рангом неопределенности могут быть реализованы по технологии «цифрового двойника», который может быть описан структурой следующего вида (рис. 4).

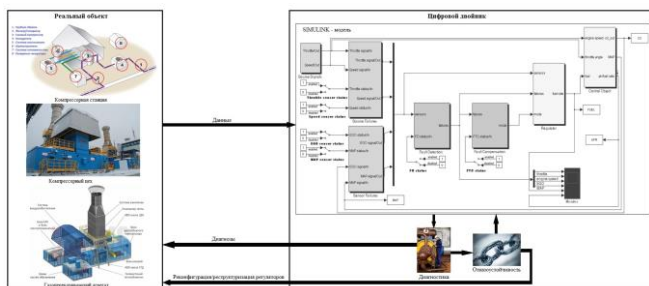


Рис. 4. «Цифровой двойник» интеллектуальной отказоустойчивой системы управления технологическим процессом транспорта газа

Основой цифрового двойника является SIMULINK-модель технической системы, актуализируемая данными, получаемыми от реального объекта. При моделировании на основе данной SIMULINK-модели параллельно с работой реального объекта решаются задачи диагностики и обеспечения отказоустойчивости. Результаты решения этих задач – диагнозы

неисправностей и параметры реконфигурации и реструктуризации регуляторов – передаются из виртуальной среды цифрового двойника реальному объекту.

III. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Еще одной важной задачей, решаемой в рамках технологии «цифрового двойника», является прогнозирование [5]. В контексте данной работы речь идет о решении задачи прогнозирования возникновения неисправностей, для решения которой в работе предлагается два метода, которые тоже могут быть реализованы на основе технологии «цифрового двойника».

При использовании технологий прогнозирующего диагностирования конечной целью является техническое обслуживание в тот момент, когда это наиболее выгодно, рентабельно. Выбор такого момента времени позволяет сократить затраты на проведение технического обслуживания, экономит время и деньги на плановые ремонты, увеличивает сроки службы оборудования, повышает безопасность производства, уменьшает в итоге количество аварий.

Для прогнозирования возникновения неисправностей и соответственно раннего обнаружения потенциального отказа оборудования (точка «Р» на рис. 5) необходимо рассчитать в режиме реального времени функцию деградации характеристик оборудования на P-F-интервале, определить и скорректировать остаточный ресурс (точка «F» на диаграмме ниже).

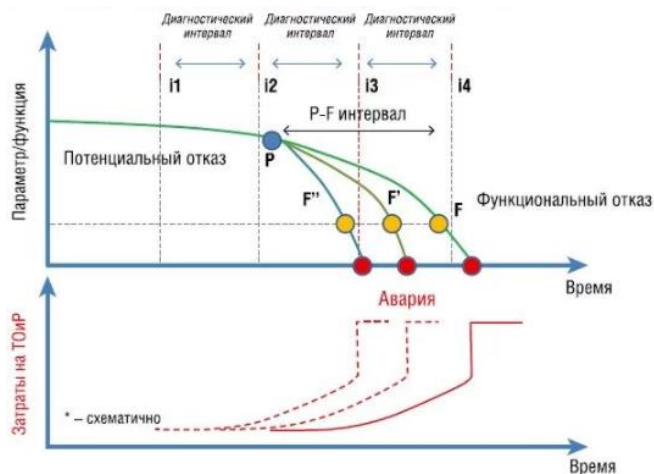


Рис. 5. Диаграмма деградации значений параметров оборудования при неисправности

Таким образом, основной задачей является раннее обнаружение точки «Р». Для чего в цифровом двойнике в режиме реального времени проводится анализ характеристик оборудования и технологических параметров, расчет прогноза возникновения функционального отказа (точка F’’’).

В результате возникает резерв времени для выполнения работ по ремонту и техническому обслуживанию с минимумом затрат и без простоев.

Данный подход является теоретической основой метода прогнозирования на основе модели экспоненциальной деградации. При реализации этого метода по технологии цифрового двойника обработка реальных данных, посылаемых исследуемым объектом в

цифровой двойник, осуществляется им, а реальному объекту возвращается информация о графиках прогноза возникновения неисправностей для принятия решений в технической системе.

Разработка метода показана на примере разработки модели экспоненциальной деградации подшипников ветряной турбины. Целью метода является получение оценки времени возникновения неисправности подшипников.

Модель экспоненциальной деградации определяется как:

$$h(t) = \phi + \theta \exp(\beta t + \varepsilon - \frac{\sigma^2}{2}),$$

где $h(t)$ – показатель здоровья как функция времени; ϕ – термин перехвата, рассматриваемый как константа; θ и β являются случайными параметрами, определяющими наклон модели, где θ является логнормально-распределенным, а β – гауссово-распределенным. ε – гауссовский белый шум, дающий $N(0, \sigma^2)$. Член $-\sigma^2/2$ в экспоненте предназначен для учета ограничения по ожиданию $h(t)$.

Модель экспоненциальной деградации получают методом главных компонент PCA (principal component analysis).

Визуализация данных в пространстве первых двух основных компонентов показывает, что первый главный компонент увеличивается по мере приближения машины к отказу (рис. 6).

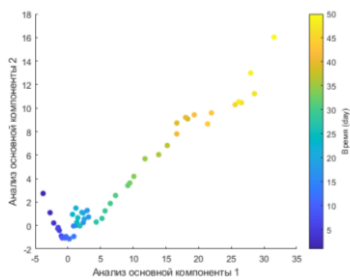


Рис. 6. Визуализация двух основных компонентов

Поэтому первый компонент является индикатором состояния здоровья (индикатором работоспособности) (рис. 7).



Рис. 7. Визуализация индикатора здоровья

На этой основе можно построить графики прогноза возникновения неисправности (рис. 8 и 9).

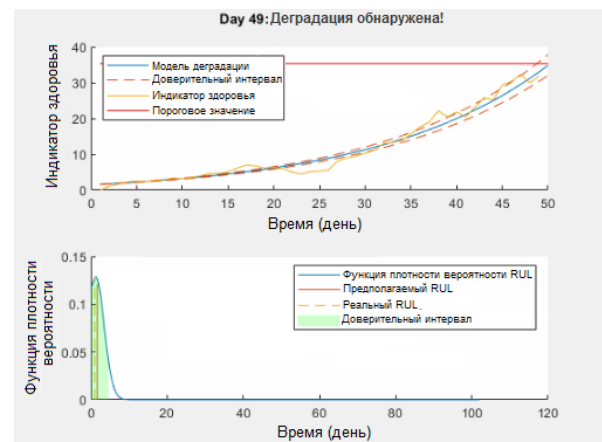


Рис. 8. Экспоненциальная деградация подшипника на 49 день

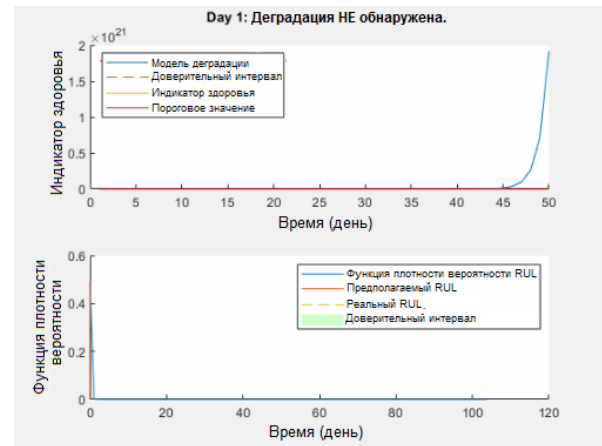


Рис. 9. Деградация не обнаружена

Второй метод анализа неисправностей – это метод на основе нечеткой когнитивной карты.

Этот метод является продолжением и развитием метода диагностики на основе нечетких графов. Но в методе диагностики на основе нечетких графов графы ограничиваются получением неориентированного графа топологической модели. Здесь же ставится задача получения топологической модели в форме ориентированного нечеткого графа, т.е. добавляется этап ориентации связей.

Идея состоит в том, что в результате получается топологическую модель процесса в виде ориентированного нечеткого графа, который в свою очередь можно рассматривать как нечеткую когнитивную карту.

Статический анализ или динамическая имитация на полученной когнитивной карте позволяет оценить поведение интересующих исследователя координат процесса и классифицировать неисправности по категориям:

- незначительная неисправность;
- полностью ликвидируемая неисправность;
- исправляемая, но ухудшается качество управления;
- авария.

Основой цифрового двойника в данном случае является как раз нечеткая когнитивная карта как модель технической системы для решения задачи прогнозирования возникновения неисправностей. В результате динамического моделирования по когнитивной карте параллельно с работой реального объекта, но вперед по шкале времени, в реальный объект возвращается прогноз о возможном возникновении неисправностей в технической системе.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье предложена концепция построения интеллектуальной отказоустойчивой системы управления на основе технологии цифровых двойников. Цифровой двойник в данном случае рассматривается как платформа для решения задач диагностики и обеспечения отказоустойчивости процесса транспортировки газа.

Также предлагаются два метода прогнозирования возникновения неисправностей – на основе модели экспоненциальной деградации и нечеткой когнитивной карты. Следует подчеркнуть особенность этих подходов, направленных не на решение традиционной задачи

диагностики как задачи обнаружения, локализации и идентификации неисправности технической системы, а на прогнозирование момента ее возникновения в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] T.R. Wanasinghe, L. Wroblewski, B.K. Petersen, R.G. Gosine, L.A. James, O. De Silva, G.K.I. Mann, and P.J. Warrian “Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 104175–104197, 2020.
- [2] M.W. Grieves “Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins,” *Complex Syst. Eng., Theory Pract.*, pp. 175–200, 2019.
- [3] D. Cearley, B. Burke, D. Smith, N. Jones, A. Chandra-sekaran, and C. Lu «Top 10 strategic technology trends for 2020». Gartner, Stamford, CT, USA, Tech. Rep., 2019
- [4] Zhuvatov T., Bataev N., Kuzyrgaliyev A., Krikbayev R. Modeling and research of gas transportation unit operation modes // *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 13, No 4, April 2019, pp. 224–234.
- [5] Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Анализ потенциальных отказов непрерывных технологических процессов на основе нечеткой топологической идентификации // *Биомедицинская Радиоэлектроника*, Изд-во «Радиотехника» (Москва), 2013. № 1, с. 25-27.