

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75>

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

© Алексей Викторович Ерпалов^{1*}, Кирилл Антонович Хорошевский¹, Ирина Викторовна Гадолина²

¹ Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Россия, 454080, Челябинск, просп. Ленина, д. 76; *e-mail: erpalovav@susu.ru

² Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4.

*Статья поступила 20 декабря 2022 г. Поступила после доработки 15 марта 2023 г.
Принята к публикации 30 марта 2023 г.*

Глобальная цифровизация производства открывает новые возможности для предиктивной диагностики технического состояния изделий машиностроения. В работе рассмотрены вопросы, связанные с оценкой технического состояния конструкций агрегатов машиностроения, прежде всего, с определением их остаточного ресурса. В настоящее время выделен класс виртуальных моделей — цифровые двойники остаточного ресурса конструкции, которые, помимо мониторинга и прогнозирования долговечности конструкций, могут обладать обратной связью и контролировать ресурс, моделируя технологический процесс производства и в конечном счете адаптивно оптимизируя реальный технологический процесс с учетом заданной вероятности наступления предельного состояния конструкции. Рассмотрены проблемы существующих методов оценки долговечности во временной и частотных областях, выявлены их сильные и слабые стороны с точки зрения применения в качестве основы алгоритмического обеспечения цифровых двойников остаточного ресурса конструкций. Отмечено возможное разнообразие получения исходных данных для оценки долговечности, а именно — кривых усталости материалов (при разных типах и схемах нагружения). Помимо схемы нагружения, на вид кривой усталости влияет процесс нагружения — регулярный, случайный или смешанный. При реальной эксплуатации изделий чаще всего преобладает нестационарное случайное нагружение (процессы с изменяющимися характеристиками, ударными импульсами), при котором методы оценки долговечности слабо изучены и в основном заключаются в упрощении нестационарного процесса. В работе особое внимание уделено нестационарным процессам нагружения, поскольку создание цифровых двойников подразумевает непрерывный анализ долговечности конструкции для реальных эксплуатационных нагрузок. Рассмотрены и другие проблемы, с которыми могут столкнуться исследователи при разработке цифровых двойников конструкций.

Ключевые слова: цифровые двойники; предиктивная диагностика; долговечность; остаточный ресурс; нестационарное нагружение; многоцикловая усталость

ACTUAL PROBLEMS OF CREATING DIGITAL TWINS OF MACHINE ENGINEERING PRODUCTS IN TERMS OF DURABILITY ASSESSMENT

© Aleksey V. Erpalov,^{1*} Kirill A. Khoroshevskii,¹ Irina V. Gadolina²

¹ South Ural State University (national research university), 76, prosp. Lenina, Chelyabinsk, 454080, Russia; *e-mail: erpalovav@susu.ru

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonyevsky per., Moscow, 101990, Russia.

Received December 20, 2022. Revised March 15, 2023. Accepted March 30, 2023.

The global digitalization of production opens new opportunities for predictive diagnostics of the technical condition of mechanical engineering products. The issues attributed to assessing their technical condition, primarily to the determination of the residual life of mechanical engineering products, are considered. Currently, a class of virtual models, digital twins of the residual life is distinguished. Apart from the functions of monitoring and predicting the stability of structures, they can possess a feedback and control the durability by simulating and optimizing the real technological process, taking into account the possibility of achieving the limit state of the structure. The problems of existing methods of assessing the durability

in time and frequency domains are considered in detail from the viewpoint of using the residual resource of structures as the basis of an algorithmic support of digital twins. We also marked the possible variety of obtaining initial data for assessing the durability, namely fatigue diagrams of materials for different types and schemes of loading. The fatigue diagram is greatly affected by the loading process (regular, random or mixed), while in the actual work the non-stationary random loading prevails. The methods used for assessing the durability of non-stationary loading are poorly studied and often resolve into simplification of a non-stationary process. The study is focused on non-stationary loading processes, since the creation of digital twins implies a continuous analysis of the durability of the structure for real operational loads. Other problems that can arise when developing digital twins of structures are also considered and discussed.

Keywords: digital twins; predictive diagnostics; durability; residual life; non-stationary loading; high-cycle fatigue.

Введение

С развитием средств диагностики технического состояния изделий и глобальной цифровизации производства в рамках четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) одной из современных мировых тенденций является создание цифровых двойников изделий машиностроения. Под цифровым двойником, в первую очередь, понимается виртуальная модель изделия, синхронизированная с реальным объектом посредством измерительных устройств и позволяющая отражать текущее техническое состояние изделия, а также прогнозировать его на некотором временном отрезке с заданной вероятностью. Машиностроительные конструкции в процессе эксплуатации подвержены знакопеременным случайным воздействиям разной интенсивности, которые в конечном итоге приводят к их усталостному разрушению. При наличии необходимых датчиков и разработанной достоверной математической модели накопления повреждений в конструкции можно отслеживать ее остаточный ресурс, а также прогнозировать долговечность с заданной вероятностью, моделируя поведение воздействующего нагружения (или моделируя технологический процесс производства). Реализация обратной связи с физическим изделием позволяет управлять его усталостной прочностью. Таким образом, цифровые двойники машиностроительных конструкций предназначены для мониторинга и прогнозирования остаточной долговечности.

Важно отметить, что цифровой двойник долговечности может формироваться для отдельной детали, узла или изделия в целом, но при переходе от конкретных деталей к общей конструкции возрастает число факторов, которые невозможно учесть, а следовательно, увеличивается погрешность предиктивной модели. Кроме того, в настоящее время отсутствуют общие регламентированные подходы к созданию цифровых двойников. Так, ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» включает только общие понятия и требования к разработке

виртуальных моделей. Однако за последние годы число публикаций, связанных с созданием цифровых двойников для прогнозирования остаточной долговечности конструкции, возросло.

В зарубежной литературе исследователи затрагивают комплексные вопросы алгоритмов прогноза долговечности, например, предлагают подход [1], основанный на использовании цифрового двойника, для прогнозирования усталостной долговечности конструкции. При этом используют виртуальную модель, которая состоит из модели отслеживания трещин и модели динамической байесовской сети (метод машинного обучения). Другие публикации затрагивают частные вопросы, например, в работе [2] для создания цифровых двойников предложено использовать трехлинейную кривую усталости материала — с учетом малоциклового, многоциклового и гигациклового усталости. Важно отметить и работу [3] по учету влияния разноуровневого нагружения, характерного как для малоциклового, так и многоциклового усталости. Авторы работы [4] при создании цифровых двойников акцентируют внимание на необходимости установки тензодатчиков на конструкцию, что позволит улучшить корреляцию виртуальной модели с реальным объектом, предлагают методы реконструкции нагрузки на объект исследования исходя из показаний тензодатчиков. Авторы ряда работ — сторонники использования существующих данных без дополнительной установки датчиков. Такой подход не всегда применим в силу нечувствительности существующих датчиков к долговечности конструкции. Так, в работе [5] затронута тема цифровых двойников для мониторинга и прогнозирования усталостного повреждения конструкции морского судна. Авторы строят прогноз, комбинируя общедоступные эксплуатационные данные конкретного судна (его глобальное местоположение в сочетании с ретроспективными метеорологическими данными) и обрабатывая данные методами машинного обучения.

В отечественной литературе результаты комплексных научно-практических исследований по вопросам создания цифровых двойников публи-

куются в ограниченном объеме. Например, в работе [6] описаны общие подходы и концепции создания цифровых двойников для оценки ресурса вагонов без конкретных алгоритмов и методов. Большинство работ — тезисные [7, 8].

Данная работа посвящена рассмотрению актуальных проблем создания цифровых двойников изделий машиностроения с позиции вероятностной оценки долговечности при реальном эксплуатационном нагружении изделий.

Будем считать наступление предельного состояния конструкции по образованию трещины. Вопросы развития и роста трещины, т.е. живучести конструкции, не рассматриваем. Учитывая, что машиностроительные конструкции испытывают знакопеременное нагружение на достаточно длительном промежутке времени, и принимая допущение, что максимальные напряжения в конструкции не превышают предела текучести материала, исследовали механизм накопления повреждений при многоцикловой усталости. Вопросы малоцикловой усталости, как и вопросы гигацикловой усталости, в работе не рассматривали.

Краткая информация об оценке долговечности

Для разработки цифровых двойников остаточного ресурса рассмотрим особенности классической оценки долговечности. В настоящее время существует большое количество схем оценки долговечности конструкций. Представим такую схему исходя из особенностей экспериментального определения усталостных свойств материала (рис. 1).

В основе любого расчета на долговечность лежат усталостные свойства материала конструкции, которые получают для лабораторных гладких образцов при заданных законе и методе нагружения. Свойства материала представляют в виде кривой усталости. Предельный переход к реальной конструкции выполняют «наложением» ее конструкторско-технологических факторов на усталостные свойства гладких образцов. Учитывают концентраторы напряжений, шероховатость поверхности, масштабный фактор, методы технологического упрочнения детали, асимметрию нагружения (преднагружение весом конструкции, линейное ускорение) и др. При этом большинство факторов снижает способность конструкции к сопротивлению усталости, а учитывают их эмпирическими зависимостями и коэффициентами. В итоге рассчитывают число циклов нагружения конструкции и, применяя одну из гипотез накопления повреждений (обычно линейную гипотезу суммирования повреждений) совместно с кривой усталости материала, оценива-

ют долговечность конструкции. С точки зрения создания цифрового двойника остаточного ресурса изделий существует ряд серьезных проблем даже при рассмотрении только многоцикловой усталости материалов.

Общие проблемы оценки долговечности конструкций

Исходные данные по усталостным свойствам материала. Одной из проблем является получение исходных данных материала — кривой усталости, которую строят по результатам серии испытаний образцов в течение длительного промежутка времени на разных уровнях циклического знакопеременного нагружения до разрушения или образования определенной трещины. При этом кривая усталости носит вероятностный характер, причем чем ближе уровень напряжений к физическому пределу выносливости материала, тем больше разброс получаемых данных по долговечности образцов. В целях набора статистики кривую строят для большого числа образцов (на каждом уровне испытывают минимум 4 – 12 образцов, выбирают четыре и более уровней напряжений). В среднем кривую усталости материала с достаточным набором представительных данных получают в течение месяца. При этом прерывание испытаний (на отдельном уровне) не допускается по причине релаксации материала.

Как отмечено выше (см. рис. 1), кривую усталости материала можно построить для разных процессов и методов нагружения. Часто используют метод нагружения при растяжении-сжатии как самый простой в реализации и часто встречаемый в эксплуатации. Обычно проводят испытания на сервогидравлических машинах для циклического нагружения на растяжение-сжатие. Однако следует учитывать, что некоторые конструкции подвергаются нагружению в результате поперечного изгиба либо кручения, а чаще всего — сложному нагружению (многоосное напряженное состояние). Именно исследование сложного нагружения конструкций в последние годы получило широкое распространение [9 – 13].

При задании разных законов нагружения при испытаниях на выносливость можно получить кардинально отличающиеся кривые усталости материала. Выделяют следующие виды нагружений: гармоническое (наиболее простое в реализации); программное (набор разных гармонических нагружений); стационарное эргодическое гауссовое случайное; нестационарное случайное (см. рис. 1).

Несмотря на существующее разнообразие методов и законов нагружения, в справочной литературе проблематично найти полноценные кри-

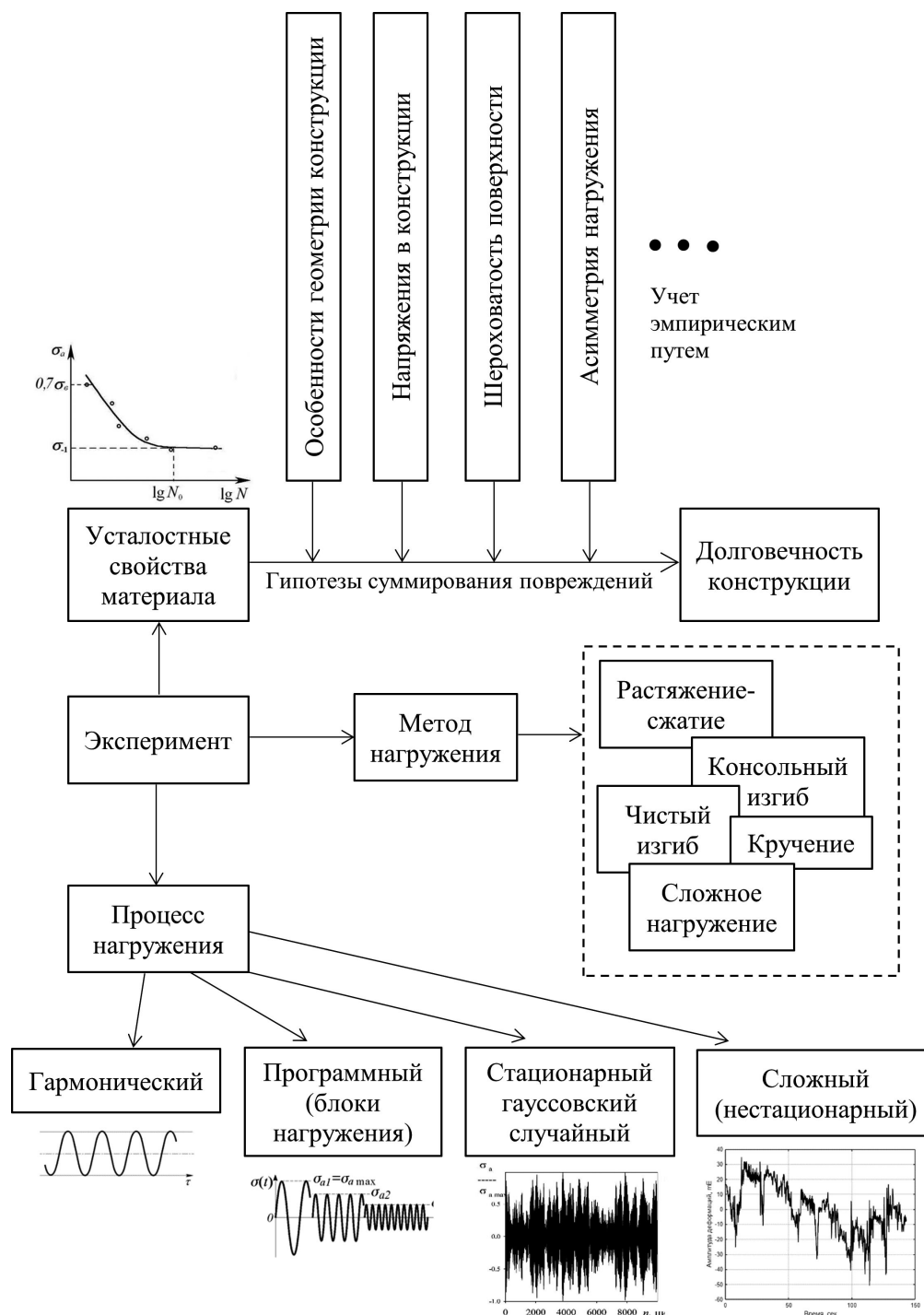


Рис. 1. Особенности расчета долговечности конструкций

Fig. 1. Features of the structure durability estimation

вые усталости многих материалов, используемых в машиностроении, даже для гармонического нагружения при растяжении-сжатии. В лучшем случае приведен предел выносливости материала. Поэтому в расчетах приходится использовать приближенные значения констант уравнений кривой усталости материала, что снижает точность прогноза долговечности, который и так

сильно подвержен вероятностной природе усталости материала.

Для создания цифровых двойников конструкций в целях оценки остаточной долговечности необходимо, в первую очередь, корректно определить усталостные свойства материала для реальных схемы и характера нагружения элементов исследуемого объекта.

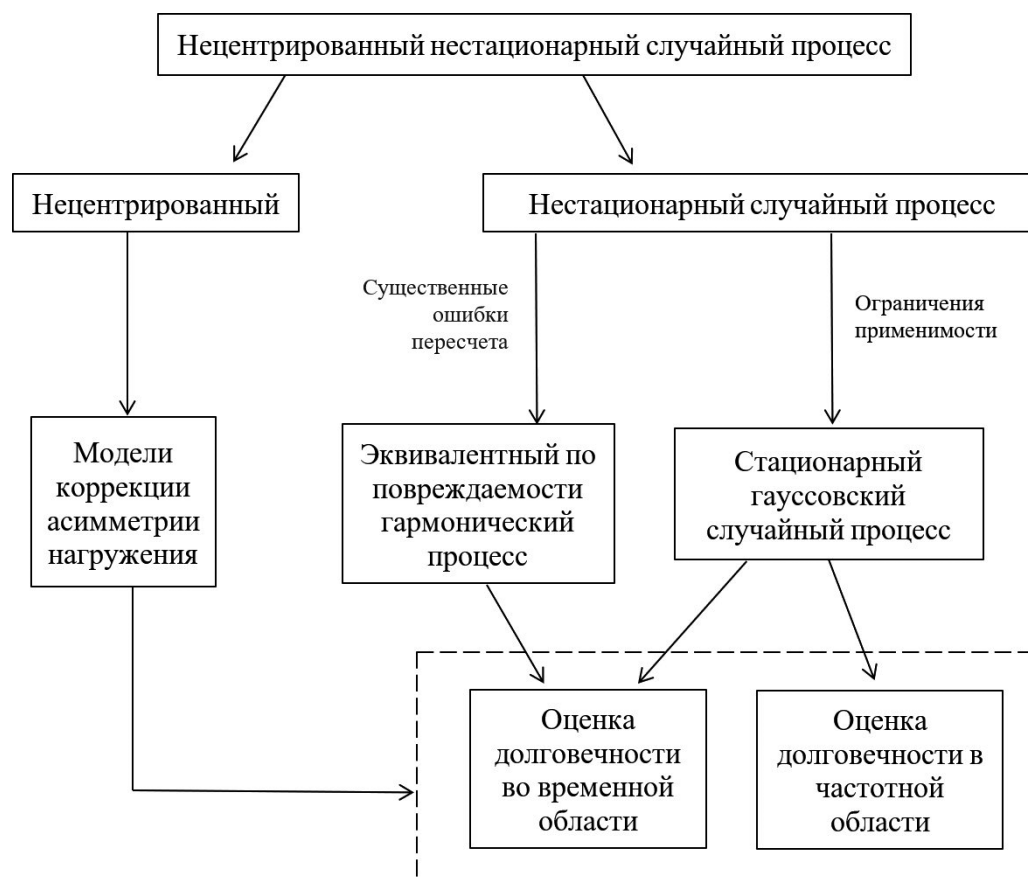


Рис. 2. Схема исследования случайных процессов с точки зрения долговечности

Fig. 2. Approaches to the study of random processes in terms of the durability

Учет реального эксплуатационного нагружения. В процессе эксплуатации изделия чаще всего подвергаются нестационарным случайным процессам нагружения, смещенным относительно нуля, т.е. нецентрированным. Под нестационарными понимаются процессы с изменяющимися во времени математическим ожиданием (трендом) и корреляционной функцией. Исследование таких процессов с точки зрения долговечности является перспективным направлением, которое активно развивается вслед за современными методами обработки сигналов. На протяжении всей истории развития методов оценки усталостной долговечности конструкций исследовали именно реальные нестационарные эксплуатационные процессы, однако отсутствие вычислительных мощностей и прогрессивных подходов к обработке сигналов не позволяло рассматривать такие процессы без их упрощений. На рис. 2 показана схема исследования случайных процессов с точки зрения долговечности.

На практике нецентрированные процессы, т.е. процессы с асимметрией, приводят к центрированным, корректируя асимметрию одним из методов при оценке долговечности конструкций [13 – 18] (см. рис. 2). Нестационарный случай-

ный процесс в самом простом варианте приводят к эквивалентному по повреждаемости гармоническому процессу нагружения, для которого в справочниках можно найти характеристики выносливости материала. Однако возникает ряд важных факторов, учесть которые не представляется возможным. Во-первых, сложно найти критерий, по которому будет оцениваться равная повреждаемость случайного и гармонического процессов. Во-вторых, не учитывается частотность процессов, скорость изменения амплитуд и продолжительность их воздействия. В-третьих, игнорируются свойства материалов к релаксации, особенно при длительной смене уровней напряжений.

Следующий этап в развитии оценки долговечности конструкций при случайном нагружении — исследования во временной и частотных областях (см. рис. 2).

Анализ процесса нагружения во временной области подразумевает схематизацию случайного процесса, которая заключается в выделении из него разных по уровню амплитуд и подсчете их частоты. Далее для оценки долговечности используют предельные характеристики сопротивления усталости материалов, полученные при

гармоническом нагружении. В связи с этим появилось большое количество методов схематизации случайных процессов — представление их в виде эквивалентного по повреждаемости набора гармонических процессов, часть из существующих методов описаны в ГОСТ 25.101–83. В настоящее время научное сообщество остановилось на использовании метода «падающего дождя» (rainflow-метод) как наиболее достоверного с точки зрения оценки долговечности. Метод падающего дождя основан на последовательном преобразовании экстремумов истории нагружения в набор закрытых петель гистерезиса напряжения (или деформации) и признании этих петель полноценными циклами. Однако у методов схематизации есть и недостатки: не учитывается частотный состав процесса и требуется знание всей реализации случайного процесса, что чаще всего не представляется возможным. С точки зрения создания цифровых двойников изделий машиностроения такой вариант может быть реализован при условии непрерывного мониторинга напряжений в опасном сечении и схематизации процесса в режиме реального времени.

С развитием математического аппарата исследователи перешли к анализу случайных процессов в частотной области. Основными инструментами здесь выступают статистические характеристики процесса (моменты) и метод разложения сигнала в ряд Фурье, из которых следует главное ограничение всех таких подходов — можно рассматривать только стационарный гауссовский процесс, обладающий свойством эргодичности. В реальных эксплуатационных условиях нагружение носит нестационарный характер и переходные процессы наряду со стационарными участками процесса нагружения могут вносить существенный вклад в развитие повреждений конструкции. Несмотря на это спектральные методы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими подходами: учитывают частотность процесса, что позволяет оценивать вибропрочность конструкций с учетом их динамических характеристик (собственные частоты и формы колебаний, коэффициенты демпфирования); не требуют знания всей случайной реализации нагружения, а представляют ее в виде «сжатых» статистических данных — осредненных спектральных характеристик процесса. Такие подходы часто применяют на стадии проектирования конструкции для анализа влияния того или иного процесса нагружения в вероятностной постановке. Их можно использовать и для непрерывного мониторинга остаточной долговечности объекта.

Создание цифровых двойников долговечности напрямую связано с анализом эксплуатационных нагрузок с датчиков в режиме реаль-

ного времени. В настоящее время существенной проблемой является отсутствие эффективных алгоритмов непрерывного анализа нестационарных сигналов с датчиков для последующей оценки долговечности.

Обработка реальных данных. Важнейшие составляющие цифровых двойников изделий машиностроения — сбор большого объема данных в процессе эксплуатации оборудования и их фильтрация в целях извлечения наиболее ценной информации с точки зрения ресурса и обработка в соответствии с алгоритмами математической модели. Исходя из этого, четко выделяют проблему, связанную с большим объемом данных, который необходимо собирать и хранить на протяжении длительного промежутка времени, параллельно накапливая статистику отказов оборудования. Например, один датчик, непрерывно собирая данные с частотой дискретизации 1024 Гц за год может собрать $32 \cdot 10^9$ точек, а обычно информацию получают не с одного, а с набора датчиков. Следующая проблема — обработка такого большого массива данных. При этом ценная информация может содержаться в весьма ограниченном объеме данных, в то время как собирают их полностью, включая все шумы и незначительные с точки зрения ресурса изменения в условиях работы оборудования. В настоящее время этой проблеме уделено отдельное внимание. Так, авторы работы [19] предлагают применять дискретизацию случайного процесса по методу пересечения уровней, что является обоснованным решением с точки зрения физики накопления повреждений и позволяет существенно оптимизировать процесс сбора информации. С другой стороны, существуют и нестандартные методы фильтрации данных нагружения — с применением методов декомпозиции случайных сигналов [20].

Таким образом, необходимы методы фильтрации и представления данных в сжатом формате. Самая главная проблема — создание алгоритмов математической модели, которые должны формироваться на основе как физических законов явления долговечности, так и статистических данных с датчиков, для прогноза остаточного ресурса в реальном времени при действии эксплуатационных нагрузок.

Структурная схема цифрового двойника для оценки долговечности

В общем виде структурная схема цифрового двойника для оценки долговечности может быть представлена в виде набора цифровых моделей. В качестве примера на рис. 3 приведена схема цифрового двойника рамы изгибо-растяжной ма-

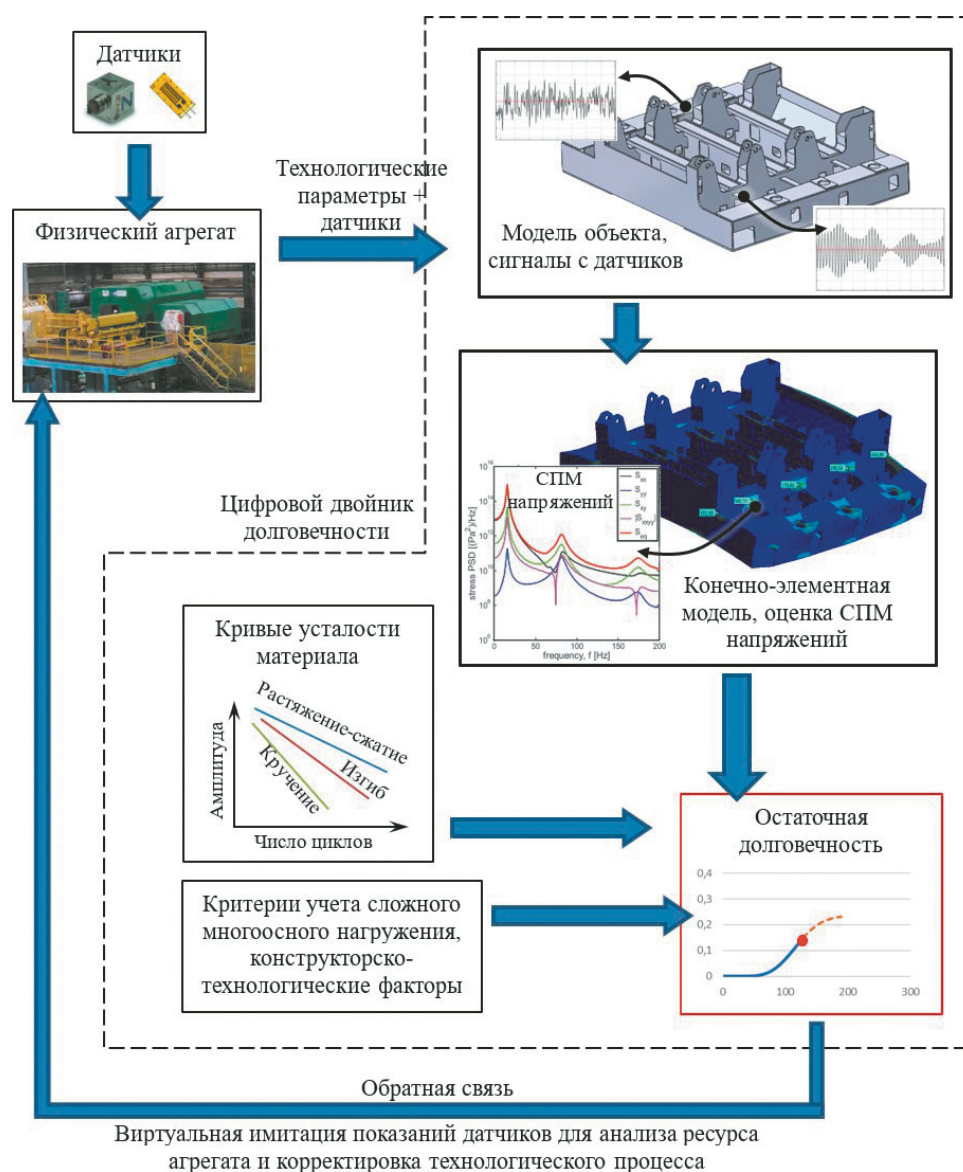


Рис. 3. Структурная схема цифрового двойника долговечности на примере рамы изгибо-растяжной машины металлургического производства (СПМ — спектральная плотность мощности)

Fig. 3. Structural diagram of the durability digital twin in the case study of the frame of a bending and stretching machine in metallurgical production (PSD — power spectrum density)

шины листопрокатного цеха металлургического производства.

Цифровую модель объекта представляют в виде набора технологических датчиков (датчиков АСУ ТП) и дополнительно установленных датчиков (акселерометров, тензодатчиков), которые непрерывно обрабатывают и обновляют конечно-элементную расчетную модель. В данном случае возможны два варианта оценки долговечности — временными или частотными методами. На рис. 3 представлена схема с применением частотных методов и оценкой спектральной плотности мощности (СПМ) напряжений. Учитывая кривые усталости материала, полученные для разных схем нагружения, принимая во внимание многоосное сложное нагружение, а также кон-

структорско-технологические факторы, оценивают текущую долговечность, которую в итоге сравнивают с проектной и в вероятностной постановке указывают остаточную долговечность объекта. При этом возможна обратная связь — оптимизация технологического процесса для контроля и увеличения ресурса объекта. Оптимизацию осуществляют путем виртуальной симуляции показаний датчиков и анализа поведения цифровой модели долговечности.

Выводы

Сформулированы проблемы создания цифровых двойников долговечности изделий машиностроения. Перечислим основные их них:

1) определение объекта цифрового двойника (отдельная деталь, узел или изделие в целом) — при переходе от конкретных деталей к общей конструкции изделия возрастает погрешность предиктивной модели, обычно вызванная большим количеством неучтенных факторов;

2) валидация виртуальной модели детали, узла или изделия;

3) фильтрация данных с датчиков и выделение наиболее ценной информации с точки зрения оценки ресурса;

4) выбор модели оценки ресурса изделия (спектральные, временные методы или их комбинации);

5) получение исходных данных характеристик выносливости материалов, используемых в конструкции (с учетом процесса и метода нагружения);

6) точность задания коэффициентов учета конструктивно-технологических факторов при оценке долговечности традиционными методами.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang M., Feng S., Incecik A., et al. Structural fatigue life prediction considering model uncertainties through a novel digital twin-driven approach / *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2022. Vol. 391. P. 114512. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114512
2. Wagener R., Maciolek A., Kaufmann H. Description of the cyclic material behaviour of aluminium wrought alloys as basis for a digital twin / *Procedia Struct. Integr.* 2019. Vol. 18. P. 490 – 500. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.191
3. Смирнова Л. Л., Зинин А. В. Структурные особенности накопления повреждений при комбинированной циклическом нагружении / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 5. С. 46 – 51. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-5-46-51
4. Chabod A. Digital Twin for Fatigue Analysis / *Procedia Struct. Integr.* 2022. Vol. 38. P. 382 – 392. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.03.039
5. Vanderhorn E., Wang Z., Mahadevan S. Towards a digital twin approach for vessel-specific fatigue damage monitoring and prognosis / *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022. Vol. 219. P. 108222. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108222
6. Шевченко Д. В. Применение цифровых двойников грузовых вагонов для контроля выработки их ресурса / *Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта: сборник трудов международной научной конференции, Коломна, 22 июня 2021 года.* — Коломна: Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», 2021. С. 130 – 136.
7. Засов В. А., Давлетшина А. И. Система мониторинга выработки и остаточного ресурсов локомотивных двигателей на основе цифровых двойников / *Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте / Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Самара, 26 – 27 января 2022 года.* — Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2022. С. 24 – 29.
8. Рыжов В. В., Дергачев П. А., Курбатов П. А. Разработка цифровых двойников мощных турбогенераторов для повышения надежности прогнозных моделей остаточного ресурса / *Тезисы XXII международной конференции по постоянным магнитам, Суздаль, 23 – 27 сентября 2019 года.* — Суздаль: Графит, 2019. С. 140 – 141.
9. Bohm M., Nieslony A. Strain-based Multiaxial Fatigue Life Evaluation Using Spectral Method / *Procedia Eng.* 2015. Vol. 101. P. 52 – 60. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.02.008
10. Karolczuk A. Application of the Gaussian process for fatigue life prediction under multiaxial loading / *Mech. Syst. Signal Proc.* 2022. Vol. 167. P. 108599. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108599
11. Msrnik M., Slavic J., Boltezar M. Multiaxial vibration fatigue — A theoretical and experimental comparison / *Mech. Syst. Signal Proc.* 2016. Vol. 76. P. 409 – 423. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.02.012
12. Nieslony A. Comparison of some selected multiaxial fatigue failure criteria dedicated for spectral method / *J. Theor. Appl. Mech.* 2010. Vol. 48. P. 233 – 254.
13. Zhang Q., Hu X., Zhang Z., et al. The mean stress and phase angle effect on multiaxial fatigue behavior of a TiAl alloy: Failure analysis and life modeling / *Int. J. Mech. Sci.* 2021. Vol. 193. P. 106123. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106123
14. Gan L., Wu H., Zhong Z. Fatigue life prediction considering mean stress effect based on random forests and kernel extreme learning machine / *Int. J. Fatigue.* 2022. Vol. 158. P. 106761. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106761
15. Kamaya M., Kawakubo M. Influence of mean stress on fatigue strength of stainless steel / *INSS J.* 2013. Vol. 20. P. 191 – 203. DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0037
16. Kamaya M., Kawakubo M. Mean stress effect on fatigue strength of stainless steel / *Int. J. Fatigue.* 2015. Vol. 74. P. 20 – 29. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.12.006
17. Nieslony A., Bohm M. Mean stress effect correction using constant stress ratio S — N curves / *Int. J. Fatigue.* 2013. Vol. 52. P. 49 – 56. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.02.019
18. Oh G. Effective stress and fatigue life prediction with mean stress correction models on a ferritic stainless steel sheet / *Int. J. Fatigue.* 2022. Vol. 157. P. 106707. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106707
19. Гадоллина И. В., Лисаченко Н. Г., Свирский Ю. А., Дубин Д. А. Выбор частоты дискретизации и оптимальный способ цифровой обработки сигналов в задачах рассмотрения случайного процесса нагружения для оценки долговечности / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 7. С. 64 – 72. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-7-64-72
20. Li R., Marzban A., Ping J., et al. A novel approach for stress cycle analysis based on empirical mode decomposition / *MFPT 2018 — Intell. Technol. Equip. Hum. Perform. Monit. Proc.* 2018. P. 4 – 12.

REFERENCE

1. Wang M., Feng S., Incecik A., et al. Structural fatigue life prediction considering model uncertainties through a novel digital twin-driven approach / *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2022. Vol. 391. P. 114512. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114512
2. Wagener R., Maciolek A., Kaufmann H. Description of the cyclic material behaviour of aluminium wrought alloys as basis for a digital twin / *Procedia Struct. Integr.* 2019. Vol. 18. P. 490 – 500. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.191
3. Smirnova L. L., Zinin A. V. Structural features of damages accumulation in conditions of combined cyclic loading / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2019. Vol. 85. N 5. P. 46 – 51 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-5-46-51
4. Chabod A. Digital Twin for Fatigue Analysis / *Procedia Struct. Integr.* 2022. Vol. 38. P. 382 – 392. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.03.039
5. Vanderhorn E., Wang Z., Mahadevan S. Towards a digital twin approach for vessel-specific fatigue damage monitoring

- and prognosis / Reliab. Eng. Syst. Saf. 2022. Vol. 219. P. 108222. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108222
6. **Shevchenko D. V.** The use of digital twins of freight cars to control the development of their resource / Scientific foundations and technologies for increasing the resource and survivability of the rolling stock of railway transport: a collection of proceedings of the international scientific conference, 2021. P. 130 – 136 [in Russian].
 7. **Zasov V. A., Davletshina A. I.** System for monitoring residual life of locomotive engines based on digital twins / Mechatronics, automation and control in transport / Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference, Samara, January 26 – January 27, 2022. — Samara: Samar. gos. univ. putei soobshch., 2022. P. 24 – 29 [in Russian].
 8. **Ryzhov V. V., Dergachev P. A., Kurbatov P. A.** Development of Digital Twins of Powerful Turbine Generators to Improve Reliability of Predictive Residual Life Models / Abstracts of the XXII International Conference on Permanent Magnets, Suzdal, 23 – 27 September 2019. — Suzdal': Grafit, 2019. P. 140 – 141 [in Russian].
 9. **Bohm M., Nieslony A.** Strain-based Multiaxial Fatigue Life Evaluation Using Spectral Method / Procedia Eng. 2015. Vol. 101. P. 52 – 60. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.02.008
 10. **Karolczuk A.** Application of the Gaussian process for fatigue life prediction under multiaxial loading / Mech. Syst. Signal Proc. 2022. Vol. 167. P. 108599. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108599
 11. **Mrsnik M., Slavic J., Boltezar M.** Multiaxial vibration fatigue — A theoretical and experimental comparison / Mech. Syst. Signal Proc. 2016. Vol. 76. P. 409 – 423. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.02.012
 12. **Nieslony A.** Comparison of some selected multiaxial fatigue failure criteria dedicated for spectral method / J. Theor. Appl. Mech. 2010. Vol. 48. P. 233 – 254.
 13. **Zhang Q., Hu X., Zhang Z., et al.** The mean stress and phase angle effect on multiaxial fatigue behavior of a TiAl alloy: Failure analysis and life modeling / Int. J. Mech. Sci. 2021. Vol. 193. P. 106123. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106123
 14. **Gan L., Wu H., Zhong Z.** Fatigue life prediction considering mean stress effect based on random forests and kernel extreme learning machine / Int. J. Fatigue. 2022. Vol. 158. P. 106761. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106761
 15. **Kamaya M., Kawakubo M.** Influence of mean stress on fatigue strength of stainless steel / INSS J. 2013. Vol. 20. P. 191 – 203. DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0037
 16. **Kamaya M., Kawakubo M.** Mean stress effect on fatigue strength of stainless steel / Int. J. Fatigue. 2015. Vol. 74. P. 20 – 29. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.12.006
 17. **Nieslony A., Bohm M.** Mean stress effect correction using constant stress ratio S — N curves / Int. J. Fatigue. 2013. Vol. 52. P. 49 – 56. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.02.019
 18. **Oh G.** Effective stress and fatigue life prediction with mean stress correction models on a ferritic stainless steel sheet / Int. J. Fatigue. 2022. Vol. 157. P. 106707. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106707
 19. **Gadolina I. V., Lisachenko N. G., Svirskiy Yu. A., Dubin D. A.** The choice of the sampling frequency and optimal method of signal digital processing in the problems considering random loading process for assessing durability / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 7. P. 64 – 72 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-7-64-72
 20. **Li R., Marzban A., Ping J., et al.** A novel approach for stress cycle analysis based on empirical mode decomposition / MFPT 2018 — Intell. Technol. Equip. Hum. Perform. Monit. Proc. 2018. P. 4 – 12.