

Искусственный интеллект как инструмент новой парадигмы построения системы взаимодействия на этапах «разработка – производство – эксплуатация» при создании перспективной вертолетной техники

Artificial intelligence as a tool of a new paradigm for a system of interaction at the stages of «development – production – operation» for the creating promising helicopter technology



А. Б. Бельский,

д. т. н., член-корреспондент РАН, зам. исполнительного директора по науке и инновационному развитию, АО «Национальный центр вертолетостроения им. М. Л. Миля и Н. И. Камова»/зав. кафедрой 102 «Проектирование вертолетов», Московский авиационный институт (НИУ)
✉ alboricovich@yandex.ru

А. В. Belskiy,

doctor of science, RARAN, deputy executive director for science and innovative development design bureau «National helicopter center Mil and Kamov»/head of department 102 «Helicopter design», Moscow aviation institute (National research university)



О. А. Есипович,

главный специалист, Научно-конструкторский центр перспективного проектирования винтокрылых летательных аппаратов, АО «Национальный центр вертолетостроения им. М. Л. Миля и Н. И. Камова»/аспирант, кафедра 102 «Проектирование вертолетов», Московский авиационный институт (НИУ)
✉ olga544@bk.ru

O. A. Esipovich,

chief specialist, Scientific and design center for advanced design of rotary-wing aircraft, design bureau «National helicopter center Mil and Kamov/postgraduate, department 102 «Helicopter design», Moscow aviation institute (National research university)



Б. Б. Сафоклов,

начальник, научно-исследовательский отдел кафедры 104 «Технологическое проектирование и управление качеством», Институт № 1 «Авиационная техника», Московский авиационный институт (НИУ)
✉ safoklovbb@mai.ru

B. B. Safoklov,

head of department, research department 104 «Technological design and quality management», Institute № 1 «Aviation technology», Moscow aviation institute (National research university)

В статье рассмотрены вопросы, задачи и направления внедрения и интеграции технологий и механизмов искусственного интеллекта (ИИ) в систему структурно-функционального взаимодействия между разработчиком-производителем и эксплуатантом вертолетной техники (ВТ) (далее — Система), а также базовые условия для формирования парадигмы нового цифрового пространства «Индустрии 4.0» на всех этапах жизненного цикла (далее — ЖЦ) ВТ, включая «этапы проектирования, производства, эксплуатации и утилизации ВТ». Авторами сформирована и обоснована обобщенная схема структурно-функционального построения Системы, а также методических подходов для внедрения инновационных технологий и механизмов с элементами применения ИИ. Разработан полунатурный стенд – прототип комплексной диагностической системы для оценки технического состояния основных функциональных систем и агрегатов ВТ, определяющих летно-технические характеристики типа ВТ (несущего винта, колонки несущего винта, трансмиссии и других). Сформирован и показан «вектор» развития предиктивной модели технического обслуживания с применением ИИ в качестве инструмента новой парадигмы развития подсистемы ЖЦ ВТ на этапе «эксплуатация».

The article discusses the issues, tasks and directions of the introduction and integration of artificial intelligence technologies and mechanisms into the system of structural and functional interaction between the developer – manufacturer and the operator of helicopter technology, as well as the basic conditions for the formation of the paradigm of the new digital space «Industry 4.0» at all stages of the life cycle of military equipment, including the «stages of design, production, operation and recycling of Helicopter.» A generalized scheme of the structural and functional construction of the System, as well as methodological approaches for the introduction of innovative technologies and mechanisms with elements of AI application, has been formed and substantiated. A semi-natural prototype stand of an integrated diagnostic system has been developed to assess the technical condition of the main functional systems and units of the Helicopter, The direction of development of the predictive maintenance model using artificial intelligence as a tool of a new paradigm for the development of the helicopter housing and communal services subsystem at the «operation» stage has been formed.

Ключевые слова: вертолетная техника, искусственный интеллект, «Индустрия 4.0», технологическое проектирование, трансмиссия, искусственная нейронная сеть, парадигма, предиктивная модель.

Keywords: helicopter technology, artificial intelligence, «industry 4.0», technological design, transmission, artificial neural network, paradigm, predictive model.

Введение

В последние годы вектор научно-технического развития отечественных образцов вертолетной техники, как сложных технических систем «функ-

ционирующих в пространстве» достигнутого уровня «Индустрии 4.0», для которых характерным критерием является «усиление научно-инновационной составляющей», межотраслевых знаний и компетенций специалистов, обеспечивающих разработку,

производство и эксплуатацию не только модернизированной и усовершенствованной ВТ, а создание и эксплуатацию принципиально новых модификаций и типов винтокрылых летательных аппаратов (ВКЛА) и цифровых технологий их проектирования, производства, логистики и т. п. Парадигма «Индустрия 4.0» формируется на основе внедрения как уже достигнутых технологических процессов и форм в организации производства, так и на основе внедрения новых прогрессивных технологий для перспективной ВКЛА нового поколения. Особое место в формируемом «цифровом пространстве» при этом занимают фундаментальные и прикладные научные исследования как в авиационной, так и смежных областях, а также новые инновационные технические решения и технологии, новые методы разработки перспективной ВТ, «нейросетевые» прикладные алгоритмы и методы на основе технологий ИИ, которые, применительно к ВТ, в сфере реализации научных и инженерных знаний и компетенций, несомненно дадут «прогрессивный толчок» как для «революционной трансформации» в «борьбе за технологическое лидерство», что для области авиации — особенно важно и своевременно [1]. Поэтому, можно с уверенностью отметить, что современный этап развития отечественной авиационной отрасли и ее вертолетной составляющей, как сложившейся системы, отличающейся высокой наукоемкостью, уже, примерно, последние 10 лет находится в пространстве технологического уклада «Индустрии 4.0» (далее «ПТУ – И 4.0»).

К основным характерным показателям «ПТУ – И 4.0» относятся:

- упор на научно технологические и технологические инновации,
- прямое использование передовых научно-технических достижений (в том числе в смежных с вертолетостроительной отраслью областях),
- развитие «новых парадигм» в отдельных составляющих на этапах жизненного цикла ВТ (от исследований и проектирования, до производства и эксплуатации),
- интеграция процессов «ПТУ – И 4.0» и дальнейшее их развитие и формирование — «единой системы 4+» (далее — ЕС 4+).

Эволюционное развитие ПТУ ЕС 4.0 до ЕС 4+ и далее до ЕС 5.0, в части ВТ (ВКЛА) просматривается в новой «продуктовой стратегии» развития холдинга «Вертолеты России» на период до 2030, до 2040 и до 2050 гг., в рамках «Стратегии развития интегрированной структуры российского вертолетостроения» [2], в которой сфера научных исследований, создание НТЗ и инновационных разработок определены как совокупность «связанных отдельных процессов и механизмов научно-технического и производственно-технологического развития холдинга». При этом главной задачей «Стратегии развития интегрированной структуры российского вертолетостроения» определено «обеспечение эффективного прохождения всего инновационного цикла создания вертолетной техники» и гарантированное максимально полное обеспечение заказчиков и потребителей качественной, конкуренто-

способной отечественной ВТ, как для внутреннего, так и для внешнего рынков.

Таким образом, инновационная политика холдинга «Вертолеты России» — представляет собой совокупность связанных мер по эффективному развитию инновационной системы, обеспечивающих на базе передовых достижений науки и техники создание и производство конкурентоспособной высокотехнологичной продукции линейки ВТ на перспективу до 2050 г. [3], а по сути программа ИТР по своему содержанию направлена на применение наукоемких технических решений и технологий для реализации в перспективных разработках ВТ. Это, в первую очередь, новые инновационные конструктивно-компоновочные и аэродинамические решения, направленные на улучшение ЛТХ и безопасности эксплуатации ВТ, а также новые функциональные и схмотехнические решения в сфере авионики: то есть комплексы бортового оборудования, систем управления, систем диагностики и прогностики технического состояния экспортных систем и др., создание и развитие которых предусматривает внедрение технологий, механизмов и элементов на основе ИИ.

Существующая обобщенная схема взаимодействия в рамках системы «разработчик – производитель – эксплуатант» в области вертолетостроения представлена в общем виде на рис. 1.

В данной системе разработчик и производитель ВТ взаимодействуют в единой подсистеме в определенных рамках и установленных требований к изделию, а эксплуатант находится на фронтире условий эксплуатации и соответственно, современных, потребностей и новых требований к ВТ [1]. Учитывая, что потребности постоянно меняются не только от условий, в которых эксплуатируется изделие, но и от изменения задач, решаемых в процессе изменения условий эксплуатации ВТ, а также других запросов на улучшение качества ВТ, иных (географических, факторов, что влияет на условия обслуживания ВТ и усложняет форму взаимопонимание и реакцию разработчика на внесение изменения в конструкцию и функционал, а также на организацию производства обновленного (модернизированного) образца ВТ на основании запросов эксплуатантов: по разным причинам от изменения

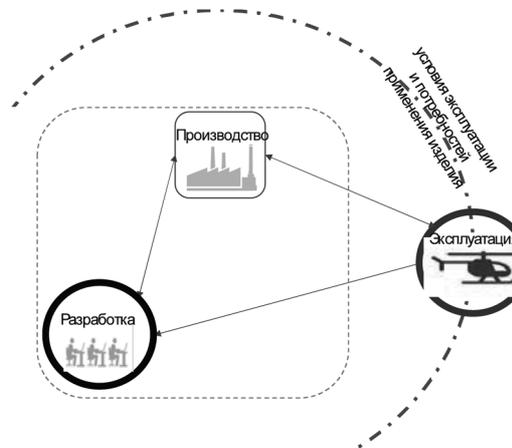


Рис. 1. Обобщенная схема взаимодействия «разработчик – производитель – эксплуатант» вертолетной техники



Рис. 2. График ограничений возможностей современного промышленного производства изделий небольшой серии и точка реализации (к такому производству относится и производство ВТ)

условий, при которых обеспечивается эксплуатация; изделия для военных типов ВТ — изменения для гражданских, возросших требований к качеству изделия и смене условий эксплуатации. Сложившаяся схема взаимодействия в действующей системе — не обеспечивает определенность в решении комплекса меняющихся факторов и задач, а производство серийных изделий по запросам эксплуатантов в условиях, когда критически важно в течение дней и даже часов не может «ответить на вызов» по «реактивному изменению потребностей» к ВТ, чтобы оперативно внести изменения в конструкцию [4], в функциональность и выпустить опытную партию ВТ.

1. Модель

Для решения задачи быстрого проектирования и организации выпуска продукции разной серийности с измененными под запросы эксплуатанта конструктив-

запросам, основывается на определении зависимости обратной пропорциональности времени на изготовление 1/T продукции от его объема N. При движении в сторону небольшой серийности, классический промышленный уклад предприятий стейкхолдеров или так называемых заинтересованных лиц, сталкивается с ограничением по времени (производственная логистика и проектирование) и серийности, в точках на границе неуправляемых решений кривой Парето [5].

Из графика видно, что конкурентное решение поставленной задачи находится в точке P за пределами области ограничений Парето и это пространство «Индустрии 4.0» использующее соответствующие технологии (рис. 2). У данного пространства другие границы, пока не определенные в рамках существующих размерностей или систем координат. Поэтому, это пространство характеризуется не постоянной скоростью производства v серии изделий N за время T, а ускорением, вычисляемое как вторая производная

$$a = \frac{dn}{dt}.$$

Следовательно, это пространство, в котором отсутствуют константы удовлетворенностей клиента, в котором производство строится на основе предвидения потребностей — на основе предиктивной философии.

Для того, чтобы преодолеть границу установленную кривой эффективности по Парето и оказаться в точке P, необходимо сформировать новые взаимоотношения между участниками процесса (рис. 3), в которой часть функции «проектирование и производство изделий разной серийности или их модификаций N_n — техническое обслуживание» — передано эксплуатанту на основе результата функционирования ИИ собирающего, обрабатывающего и анализирующего данные со всех локаций применения ВТ, и выдающего после этого оптимальные директивы, а так же, более того управляющего формированием оптимального технического облика ВТ в проектной составляющей

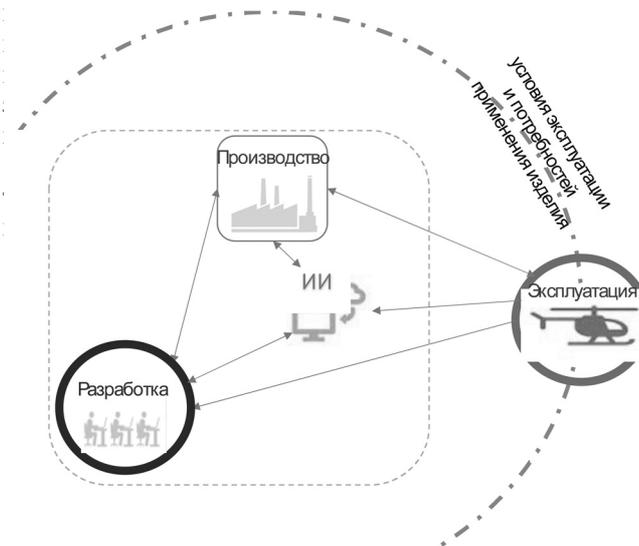


Рис. 3. Схема взаимодействия «разработчик – производитель – эксплуатант» вертолетной техники с применением ИИ, в качестве инструмента контроля и управления связями

для вновь создаваемых или модернизированных моделей ВТ.

При этом видно, что точка Р графика на кривой ожидания, находящаяся за пределами графика эффективности по Парето, является критически важным конкурентным маркером в области эффективного ответа при предиктивном ТО в новой парадигме эксплуатации и возможности формирования нового технологического облика ВТ, и характеристике изделий в дальнейшем. В этой точке реализуется модель, использующая инструментарий и совокупность технологий пространства «концепции «Индустрия 4.0»» одним из которых является ИИ, а также открытые алгоритмы реализации и дальнейшего развития индустрии при переходе к технологическому укладу 4+ и 5.0.

2. Определение места и роли ИИ

Отметим, что складывающаяся реальность для решения обозначенной проблемной задачи диктует нам необходимость учета различных изменений, такие изменения возможны только в случае выхода за границу сформированного базиса современных промышленных платформ [6] и платформизации в рамках концепции «Индустрия 4.0», где применение ИИ выступает как «новый модельный подход» и как комплекс в системе накопления и обмена данными для работы в меняющихся условиях (потребностях), в том числе с учетом внедрения новых производственных технологий и производств [7]. «Модель ИИ»

невозможно реализовать вне концепции «Индустрии 4.0» без новых инновационных решений и способов обработки информации, внедрения прогрессивных механизмов и инструментов принятия решений, организации новых типов производств и «экологической энергетикой» этих производств, т. е. общесистемного подхода по реализации технологии платформенных решений [8].

Учитывая изложенной, сформируем технологический облик системы с применением ИИ интегрированной в перспективное производство ВТ рис. 4.

3. ИИ как инструмент новой парадигмы ТО ВТ

Сформировав понимание задач и роль технологий и механизмов с применением ИИ в системе производства ВТ, а также область его существования, становится очевидным, что инструменты и технологии, используемые в формировании базы знаний, по своей сути являются производными от данных полученных современными методами и средствами мониторинга ВТ, встроенных в комплексы бортового оборудования (КБО) Данное «понимание» формирует инструментарий на базе сверхбыстрых ЭВМ и программ в схематических реалиях и технологиях, саморазвивающихся и взаимосвязанных интеллектуальных взаимодействий, в которых решения принимаются на основании самообучающихся систем обмена данными, т. е. в автоматическом режиме и в реальной цифровой среде (рис. 5).

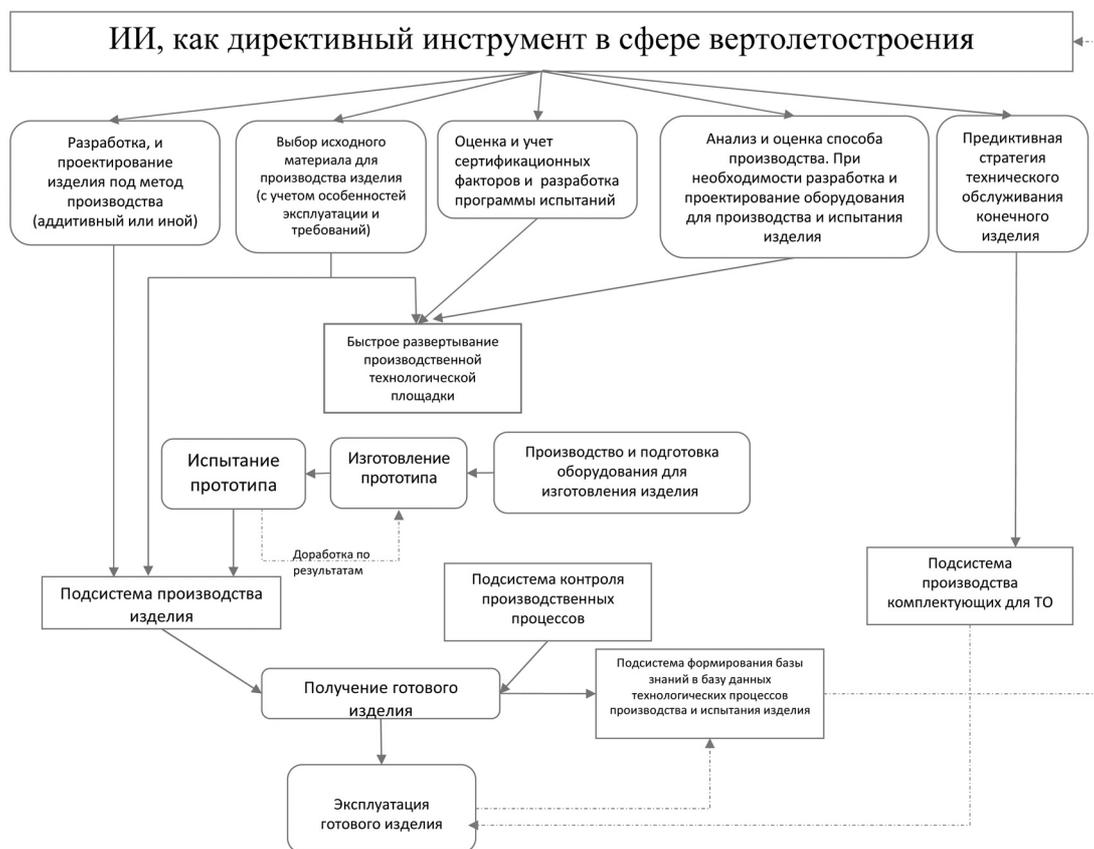


Рис. 4. Блок-схема процесса «Система применения ИИ интегрированного в перспективное производство ВТ»



Рис. 5. Схема контроля состояния ВТ с применением ИИ

Таким образом, функционально в структуре комплекса бортового оборудования (КБО) ВТ формируется «система самодиагностики», представляющая собой совокупность датчиков, динамически отслеживающих состояние конкретного типа ВТ. Данные поступают в интегрированный блок-накопитель, предусмотренный в структуре КБО. Блок-накопитель (БН) обрабатывает полученные сигналы и выдает их в бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ) для формирования отказных и предупредительных сообщений экипажу ВТ и дублирует в систему внешнего накопителя (сервера) для анализа с помощью ИНС «big data» данных,

например через низкоорбитальную спутниковую группировку. При этом, автономный, наземный нейросетевой комплекс (ННК) может принимать информацию по техническому состоянию целого парка ВТ (одного типа или разных типов), эксплуатируемых потребителями ВТ в различных условиях, в различных географических регионах и т. д. Полученная информация будет накапливаться, систематизироваться, обобщаться и в дальнейшем использоваться для формирования статистических баз, данные из которых по специальным «оценочным» алгоритмам позволят учесть опыт эксплуатации по парку ВТ в целом, а также реально

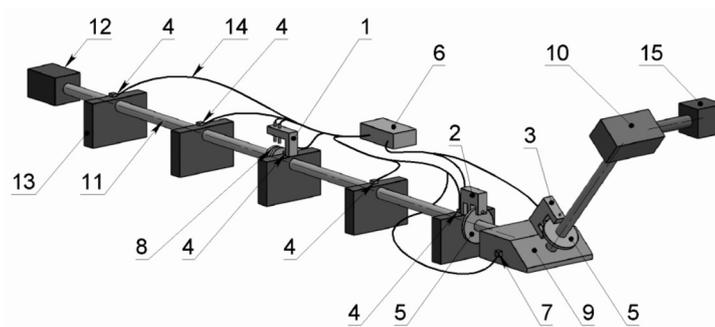


Рис. 6. Схема полунатурного стенда для испытаний трансмиссии ВКЛА:

- 1 — кронштейн с установленными датчиками частоты вращения; 2 — кронштейн на опоре вала с установленными датчиками угловых перемещений; 3 — кронштейн на промежуточном редукторе с установленными датчиками угловых перемещений; 4 — кронштейн с установленными датчиками вибрации; 5 — диски; 6 — блок-регистратор; 7 — датчик вибрации, установленный на промежуточном редукторе; 8 — индуктор; 9 — промежуточный редуктор; 10 — хвостовой редуктор; 11 — хвостовой вал; 12 — главный редуктор; 13 — опора хвостового вала с датчиками; 14 — электрические кабели

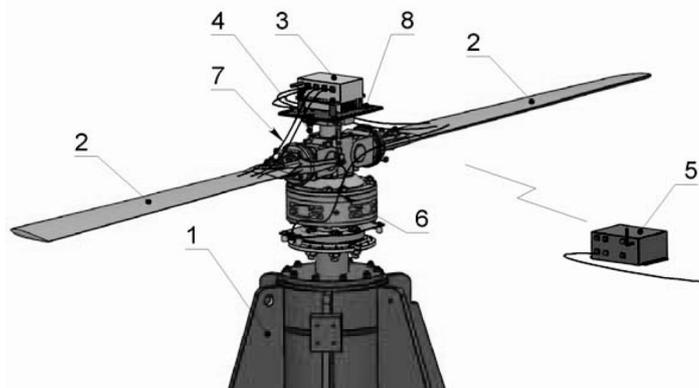


Рис. 7. Схема полунатурного стенда для испытаний колонки НВ и НВБ:

- 1 — стенд АДС; 2 — лопасти с ВОД и ТР (см. рис. 7); 3 — блок-регистратор; 4 — антенна; 5 — бортовой вычислитель; 6 — электрические кабели для ТР; 7 — волоконные кабели для ВОД; 8 — кронштейн для установки блока-регистратора и антенны

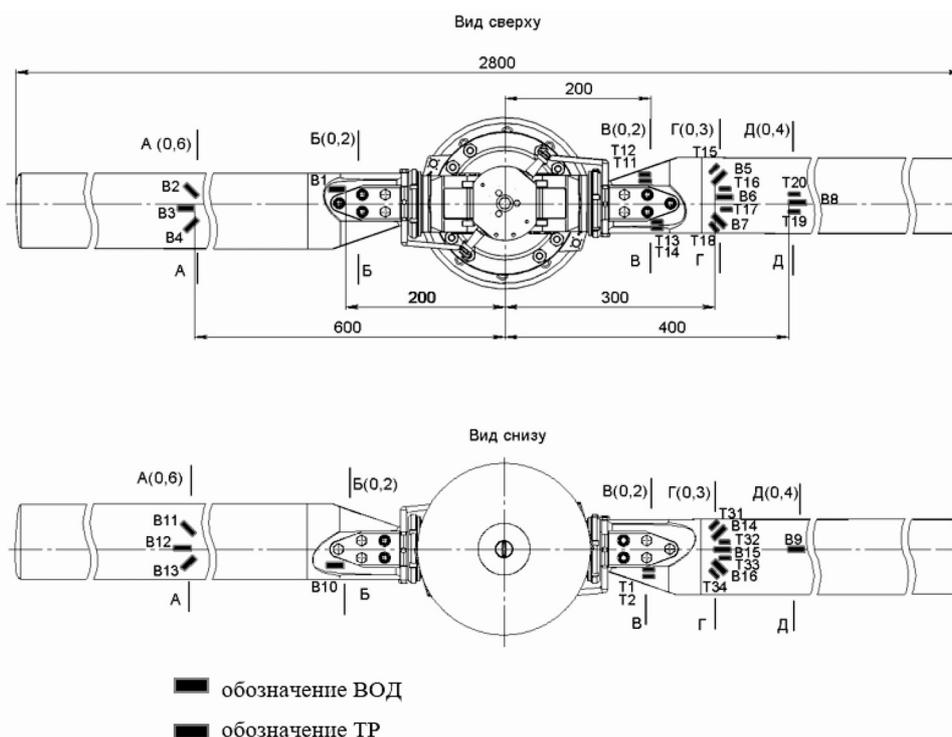


Рис. 8. Схема расположения датчиков

будут иметь возможность прогнозировать отказы и остаточные ресурсы для конкретного типа ВТ с учетом индивидуальных особенностей его эксплуатации. На основании полученных данных как правило и строятся предиктивные модели ТО систем, узлов и агрегатов эксплуатируемой ВТ.

4. Эксперимент

Для подтверждения работоспособности предиктивной модели ТО с применением ИИ в качестве инструмента нами был проведен эксперимент:

- Построен полунатурный стенд комплексной диагностической системы несущего винта, колонки несущего винта и трансмиссии вертолета.
- Определены способы получения данных мониторинга.

- Собраны данные характеризующие показатели рабочего состояния технического состояния несущего винта, колонки несущего винта и трансмиссии вертолета, и пограничного состояния перед поломкой.
- Полученные данные каждой групп сигналов при помощи ИИ были приведены в характеристику ресурса и сформированы в одну базу данных (data base).

5. Сбор данных

С целью получения данных для исследования разработан полунатурный стенд моделирования и мониторинга работоспособности комплексной диагностической системы несущего винта, колонки несущего винта и трансмиссии вертолета, имитирующий

Таблица 1

Перечень контролируемых параметров и методов контроля стендов трансмиссии и НВ ВКЛА

№	Наименование конструкции и/или агрегата	Контролируемые параметры состояния деталей и обнаружение дефектов	Методы контроля
1	Торсионы	Целостность пластин	Тензометрирование
2	Узлы навески лопастей	Наличие трещин и остаточных деформаций	Тензометрирование
3	Вал несущего винта	Наличие трещин и остаточных деформаций; крутящий момент	Измерение взаимного положения частей вала (скручивание вала); тензометрирование
4	Главный, промежуточный и хвостовой редуктора	Крутящий момент; частота вращения; угол поворота; температура подшипников	Вибродиагностика; фазохронометрический метод; термометрирование
5	Элементы трансмиссии (подшипниковые опоры, муфты)	Повреждения подшипников; частичная или полная потеря работоспособности подшипников; частота вращения; температура подшипников	Вибродиагностика; фазохронометрический метод; термометрирование
6	Несущий винт	Балансировка, нагрузки: изгибные, крутильные; наличие и развитие дефектов; соконусность	Тензометрирование; измерение расстояния (оптический трекер)
7	Хвостовой вал	Крутящий момент; частота вращения, угол поворота; весовая балансировка	Измерение взаимного положения частей вала (скручивание вала); вибродиагностика; фазохронометрический метод

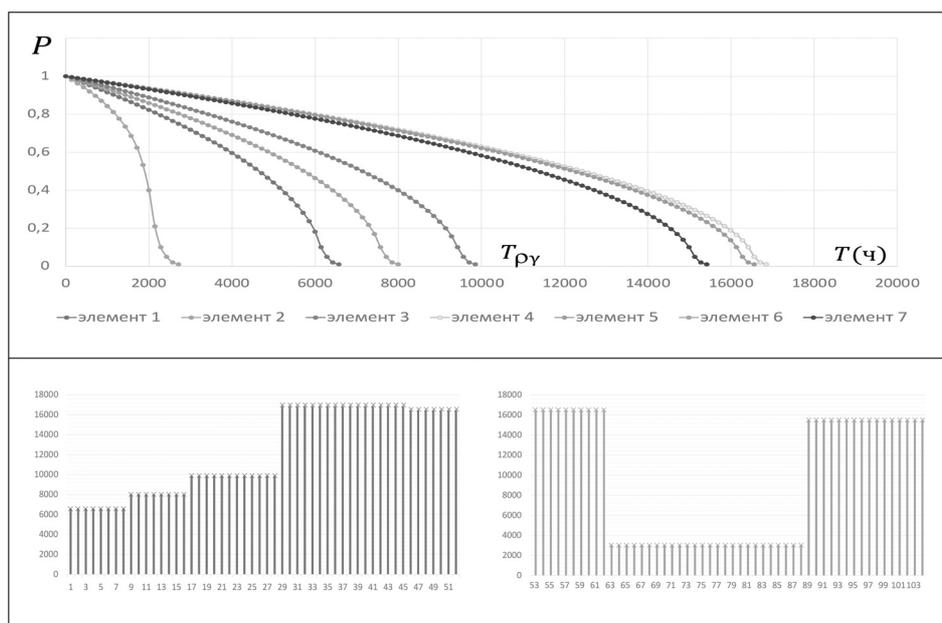


Рис. 9. Прогноз предельного состояния элементов системы и оценка ресурса в полетных часах

рабочее и дефектное техническое состояния ВТ при эксплуатации. Общий алгоритм получения данных диагностики заключался в измерении параметров, соответствующих состоянию объекта, с помощью установленных на контролируемый объект датчиков (рис. 6-8) [1, 9, 10].

Количество установленных датчиков для экспериментальной системы мониторинга работоспособности 104 шт.:

- датчики вибрации — 24 шт.;
- волоконно-оптических датчики деформации и температуры (ВОД) — 16 шт.;
- тензорезисторы (ТР) — 34 шт.;
- датчики частоты вращения (фазы) — 12 шт.;
- термодатчики — 10 шт.;
- датчики измерения крутящего момента — 4 шт.;
- датчики угловых перемещений — 4 шт.

Перечень объектов контроля, контролируемых параметров и методов контроля представлен в табл. 1.

6. Анализ данных

Методом ИИ полученные наборы данных мониторинга каждой групп сигналов были приведены в характеристику ресурса и сформированы в одну базу данных (data base). Работа ИИ строилась с применением ИНС для прогноза времени до отказа, уравнение:

$$P(T_{py}) = \int_{T_{py}}^{\infty} P(T_{\rho}) dT_{\rho} = \frac{\gamma}{100},$$

где T_{py} — наработка до предельного состояния (ресурса).

Прогнозные данные для каждого компонента брались по набору контрольных сигналов рабочего состояния и состояния, соответствующего дефектному, после обработки которых ИИ выдал прогноз ресурса до отказа (рис. 9).

Выводы

Проведенными исследованиями была изучена возможность применения методов искусственного интеллекта для оценки технического состояния элементов системы по комплексным характеристикам.

В качестве входных данных для анализа, использовалась полученная информация системы мониторинга полунатурного стенда оценки технического состояния основных функциональных систем определяющих летно-технические характеристики ВТ. При помощи ИИ было получено временная характеристика ресурса элемента системы — прогноз развития неисправности или, другими словами, оценка (прогноз) остаточного ресурса, оставшийся срок службы (RUL) — время, в течение которого компонент будет работать, прежде чем потребуются ремонт или замена (T_{RUL}) в конце анализа (T_{END}).

Исходя из этого, рассчитывается время жизни каждого компонента:

$$T_i = T_{RUL_i} + T_{END_i}; i = 1, 2, \dots, N.$$

Набор прогнозных данных о времени жизни компонента (данные по ресурсу) — $T_p = f(\text{DATA}_{ahm})$ может быть использован для сравнения с назначенным ресурсом для аналогичных компонентов вертолета.

Заключение

На основании полученных данных и результатов экспериментальной отработки методов диагностики системы мониторинга сформирован вектор дальнейших исследований для применения ИИ при моделировании предиктивной (прогностической) модели технического обслуживания ВТ в частности и как директивного инструмента в перспективном производстве ВТ в целом.

Список использованных источников

1. А. Б. Бельский. Перспективные исследования и инновационные разработки для новой вертолетной техники //Фотоника. № 4. 2013. С. 66-74.
2. Инновации. АО Вертолеты России. <https://rhc.aero/innovation?ysclid=log6ulgdyq257359916>.
3. Программа инновационного развития Холдинга «Вертолеты России». АО Вертолеты России. <https://www.rhc.aero/uploads/reports/innovation/ПД-20-010%20от%2026.02.2020.pdf>.
4. С. В. Ганин, О. С. Долгов, Б. Б. Сафоклов. Мобильная технологическая платформа как технология и инструментарий, используемый в условиях критически важного быстрого проектирования и производства изделий небольшой серийности//Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 78-83. doi: 10.34759/vst-2023-2-78-83.
5. М. Блауг. Экономическая теория благосостояния Парето//Экономическая мысль в ретроспективе/Пер. с англ. 4-е изд. М.: Дело, 1994. С. 540-561.
6. О. Н. Антипина. Платформы как многосторонние рынки эпохи цифровизации//Мировая экономика и международные отношения. 2020. Т. 64. № 3. С. 12-19. doi: 10.20542/0131-2227-2020-64-3-12-19.
7. А. Б. Бельский, А. И. Ресинец. Систематизация подходов для комплексного решения задачи повышения безопасности полетов вертолетной техники//Качество и жизнь. 2022. № 2. С. 82-90.
8. S. Serebryansky, M. Shkurin. Predictive Assessment of the Development of Unmanned Aviation System//Journal of Engineering Science and Technology Review, 2022, 15 (6). P. 149-154.
9. B. Safoklov, D. Prokopenko, Y. Deniskin, M. Kostyshak. Model of aircraft maintenance repair and overhaul using artificial neural networks//Transportation Research Procedia. June 2022, 63 (9): 1534-1543.
10. D. Yu. Strelets, S. A. Serebryansky, M. V. Shkurin. Research of the possibility of improving the traction and economic characteristics of a supersonic passenger aircraft engine through minimal modifications to the high-pressure compressor//Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2094 (4), 042055.

References

1. A. B. Belsky. Promising research and innovative developments for new helicopter technology//Photonics. № 4. 2013. P. 66-74.
2. Innovation. JSC Helicopters of Russia. <https://rhc.aero/innovation?ysclid=log6ulgdyq257359916>.
3. The program of innovative development of the Russian Helicopters Holding. JSC Helicopters of Russia. <https://www.rhc.aero/uploads/reports/innovation/ПД-20-010%20от%2026.02.2020.pdf>.
4. S. V. Ganin, O. S. Dolgov, B. B. Safoklov. Mobile technology platform as a technology and tools used in the conditions of critical rapid design and production of small-batch products//Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2023. Vol. 30. № 2. P. 78-83. doi: 10.34759/vst-2023-2-78-83.
5. M. Blaug. Pareto's Economic theory of Well-being //Economic thought in retrospect/Trans. from English 4th ed. Moscow: Delo, 1994. P. 540-561.
6. O. N. Antipina. Platforms as multilateral markets of the era of digitalization//World Economy and International Relations. 2020. Vol. 64. № 3. P. 12-19. doi: 10.20542/0131-2227-2020-64-3-12-19.
7. A. B. Belsky, A. I. Resinets. Systematization of approaches for the complex solution of the problem of improving the safety of helicopter technology flights//Quality and life. 2022. № 2. P. 82-90.
8. S. Serebryansky, M. Shkurin. Predictive Assessment of the Development of Unmanned Aviation System//Journal of Engineering Science and Technology Review, 2022, 15 (6). P. 149-154.
9. B. Safoklov, D. Prokopenko, Y. Deniskin, M. Kostyshak. Model of aircraft maintenance repair and overhaul using artificial neural networks//Transportation Research Procedia. June 2022, 63 (9): 1534-1543.
10. D. Yu. Strelets, S. A. Serebryansky, M. V. Shkurin. Research of the possibility of improving the traction and economic characteristics of a supersonic passenger aircraft engine through minimal modifications to the high-pressure compressor//Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2094 (4), 042055.