

## РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

© В. М. Балашов<sup>1</sup>✉, Е. А. Мажайцев<sup>2</sup>, Е. Г. Семенова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»,  
balashov\_vm@radar-mms.com, Санкт-Петербург, Российская Федерация;  
<sup>2</sup> кафедра «Информационные системы и программная инженерия»;  
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет  
«ВОЕНМЕХ им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Ключевые слова:** достоверность; испытательное оборудование; моделирование; надежность; производственно-технологический комплекс.

**Аннотация:** Предложена гибридная модель цифрового двойника производственно-технологических комплексов, объединяющая методы адаптивной фильтрации сигналов от измерительных датчиков, методы машинного обучения и физико-статистического моделирования. Модель включает трехуровневую систему детектирования аномалий на основе метода главных компонент (РСА), LSTM-сетей и анализа кросс-корреляций. Экспериментальная проверка предложенной модели на данных, получаемых с турбогенератора, подтвердила эффективность прогнозирования производственных и эксплуатационных отказов.

---

### Введение

Стремительное и прорывное развитие концепции Индустрия 4.0, где технологии цифрового двойника становятся ключевым инструментом предиктивной аналитики, сталкивается с рядом технологических вызовов в сфере современных и перспективных производственно-технологических комплексов [1, 2], в том числе:

– производственно-технологический комплекс (ПТК) включает большое количество элементов, функционирование которых трудно описать из-за множества зависимостей между его модулями, на каждой части которого может находиться множество различных датчиков. По данным ISA-2024 [3], аналоговые датчики занимают 62 % от общего количества элементов ПТК, цифровые интерфейсы к HART и Modbus – порядка 38 %, а на беспроводные сенсоры и интерфейсы приходится менее 5 %;

– значительная доля (до 23 %) потерь производительности и приостановки работы оборудования связана с отсутствием механизма кросс-проверки данных от разнородных датчиков и поздним обнаружением аппаратных сбоев [3].

Данные проблемы приводят к необходимости поиска современных подходов для предиктивного обслуживания сложных технических систем с минимизацией потерь работоспособности и обслуживания оборудования.

### Описание модели цифрового двойника производственно-технологических комплексов

Традиционные подходы описания производственно-технологических комплексов обладают рядом недостатков, сведенных в табл. 1 [4].

Для устранения выделенных недостатков предлагается новая гибридная модель цифрового двойника ПТК, включающая четыре основных этапа:

Методы описания производственно-технологических комплексов

Метод	Проблемы	Примеры реализаций
Только цифровая обработка	Игнорирует 60 % аналоговых данных	Siemens MindSphere, PTC ThingWorx
Раздельные контуры	Рассогласование данных ( $\Delta t = 50 \dots 200$ мс)	ABB Ability, GE Predix
Упрощенные фильтры	Потеря 12 – 15 % полезного сигнала	Rockwell FactoryTalk

- адаптивную предобработку сигналов цифровых и аналоговых данных;
- гибридную нормализацию данных;
- многоуровневое детектирование аномалий;
- верификацию результирующих значений.

В производственно-технологических комплексах исходные данные с датчиков содержат полезный сигнал  $S(t)$ , систематические искажения  $D(t)$  и случайный шум  $N(t)$

$$X_{\text{raw}}(t) = S(t)D(t) + N(t).$$

Для обработки нестационарных сигналов с датчиков ПТК предложен каскадный фильтр, объединяющий преимущества медианной и калмановской фильтрации и обеспечивающий подавление импульсных помех:

$$y_{\text{med}}[n] = \text{median} \{x[n-2], x[n-1], x[n], x[n+1], x[n+2]\},$$

где  $x$  – исходный сигнал;  $n$  – индекс текущего отсчета в последовательности данных.

Выбор медианного значения в скользящем окне обеспечивает эффективное устранение выбросов при сохранении фронтов сигнала. Для типичных промышленных сигналов с частотой дискретизации 1...10 кГц оптимален 5-й порядок, обеспечивающий компромисс между качеством фильтрации и временной задержкой.

Параллельно применяется модифицированный фильтр Калмана с адаптивным параметром процесса

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k,$$

где  $x_k$  – априорная оценка состояния на шаге  $k$  (прогноз до учета новых измерений);  $F_k$  – матрица перехода состояния;  $x_{k-1}$  – апостериорная оценка состояния на шаге  $k-1$  (после учета прошлых измерений);  $B_k$  – связь управляющего воздействия с состоянием);  $u_k$  – управляющий вектор.

Прогноз ковариационной ошибки

$$P_k = F_{k-1} P_{k-1} F_k^T + Q_k,$$

где  $P_k$  – априорная ковариация ошибки;  $F_{k-1}$  – апостериорная ковариация на шаге  $k-1$ ;  $Q_k$  – ковариация шума процесса.

Расчет коэффициента Калмана

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1},$$

где  $H_k$  – матрица наблюдений, связывающая состояние с измерением;  $R_k$  – ковариация шума измерений.

По скользящей дисперсии остатков динамически корректируется

$$Q_k = \alpha \operatorname{var}(x_k - L_k) \mathbf{I},$$

где  $\alpha$  – весовой коэффициент адаптации;  $\operatorname{var}(x_k - L_k)$  – дисперсия сигнала в скользящем окне,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Коэффициент смешивания  $\alpha(t)$  определяется через энтропию Шеннона в скользящем окне из 100 отсчетов

$$\alpha(t) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta(H(t) - H_0))},$$

где  $H(t) = -\sum p(x_i) \log p(x_i)$ ;  $\beta = 0,5$  – коэффициент чувствительности сигмоиды;  $H_0$  – базовая энтропия.

После обработки исходных данных происходит их нормирование за счет модифицированного  $z$ -нормирования

$$z_i = (x_i - \mu_{\text{rol}}) / (\sigma_{\text{rol}} + \varepsilon),$$

где  $\mu_{\text{rol}}$  – скользящее среднее за 24 ч;  $\sigma_{\text{rol}}$  – скользящее СКО за 24 ч;  $\varepsilon = 0,1\sigma$  – защита от деления на ноль.

Процесс детектирования аномалий основан на трехуровневом иерархическом подходе, обеспечивающем максимальную надежность за счет комбинации методов с разной детализацией анализа. Каждый уровень отвечает за свой тип отклонений, обеспечивая постепенное углубление диагностики – от аппаратных сбоев до комплексных каскадных отказов.

На первом уровне проверяются аппаратные сбои, которые представлены неоднородным процессом Пуассона с интенсивностью

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \sum w_i \operatorname{EMA}(|x_i - x_{\text{ref}}|),$$

где  $\lambda_0$  – базовая интенсивность отказов;  $w_i$  – вес  $i$ -го коэффициента;  $\operatorname{EMA}$  – экспоненциальное скользящее среднее;  $x_i$  – текущее значение параметра;  $x_{\text{ref}}$  – эталонное значение (определяется документацией оборудования).

Вероятность отказа при этом представлена как

$$P_{\text{fail}}(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) dt\right),$$

где  $\lambda(\tau)$  – интенсивность отказов в момент  $\tau$ .

На втором уровне для процессных аномалий используется метод главных компонент PCA (*англ.* Principal Component Analysis) в скользящем окне. Данный метод позволяет обрабатывать набор больших данных и выделять скрытые параметры между этими данными, что дает возможность минимизировать чувствительность к выбросам при обучении.

На последнем уровне прогнозируются каскадные сбои методом кросс-корреляции между параметрами

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (x_t - \mu_x)(y_{t+\tau} - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y (N - \tau)},$$

где  $\rho_{xy}$  – коэффициент корреляции;  $\tau$  – временной сдвиг (при условии, что всегда должен быть  $> 0$ );  $\sigma$  – стандартное отклонение.

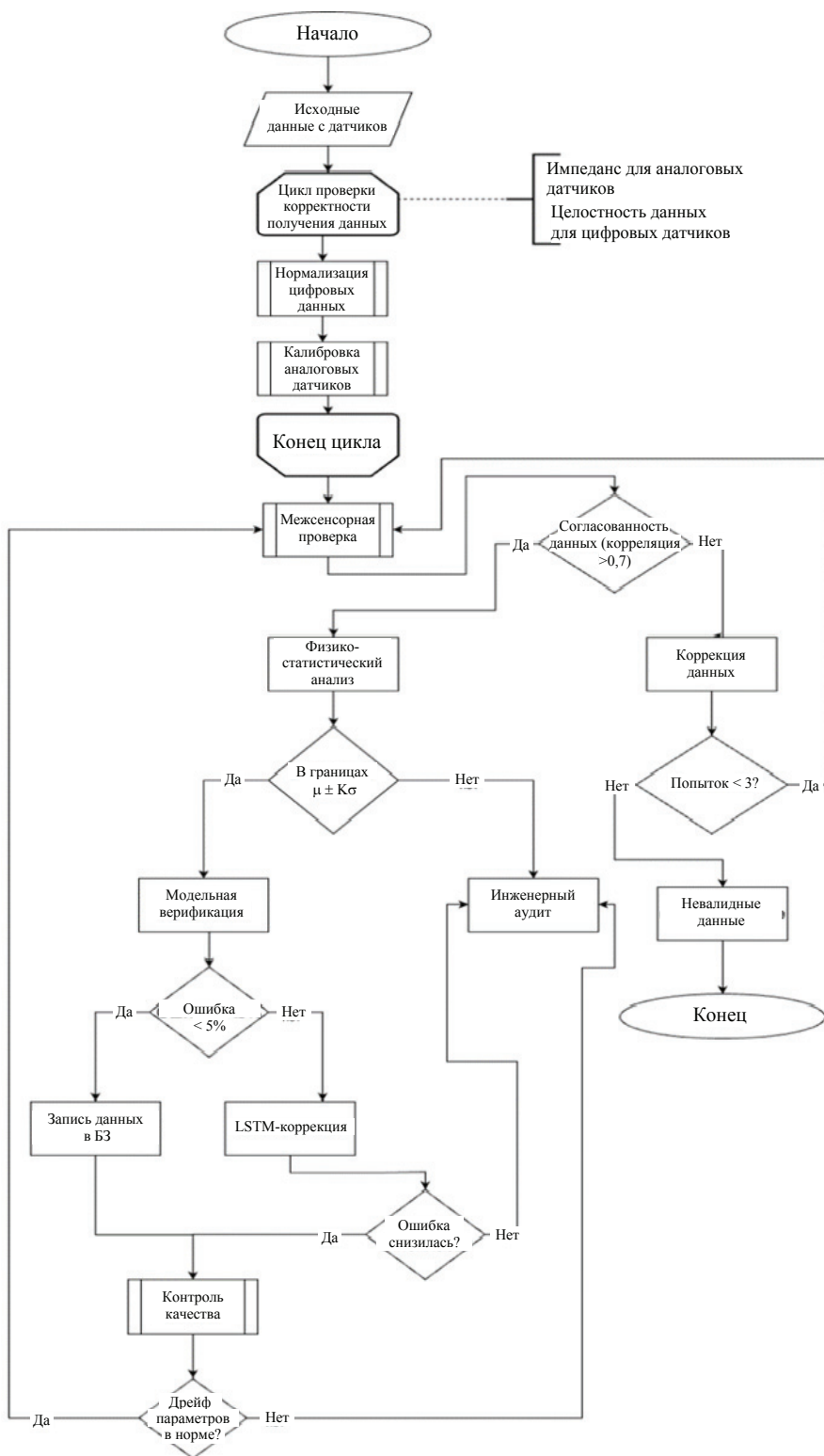


Рис. 1. Модель цифрового двойника

## Результаты эксперимента

Метрика	Модели		
	цифровые	аналоговые	гибридная
Точность детекции, %	96,2	89,8	98,7
Задержка, с	8,2	14,4	11,9
Доля отрицательных предсказаний FPR, %	1,8	3,1	0,9

Для прогнозирования критических параметров в результате детектирования аномалий применяется LSTM-сеть, обучаемая на оставшихся данных

$$x(t) - f_{\text{phys}}(x(t)),$$

где  $f_{\text{phys}}$  – упрощенная физическая модель (например, уравнение теплопередачи).

На рисунке 1 представлена реализованная математическая модель цифрового двойника.

Верификация результирующих значений оценивается по согласованности временных меток и физико-статистических параметров, представленных в технико-эксплуатационной документации ПТК [5]. Для оценки достоверности предложенной модели разработана имитационная модель цифрового двойника турбогенератора с использованием языка программирования Python и библиотеки TensorFlow с тремя типами датчиков: температуры, давления и шума. Использованы имитационные данные 28 датчиков, 12 из которых – аналоговые, а 16 – цифровые. Частота дискретизации 10 кГц. Объем выборки составил 1,2 млн отсчетов по каждому параметру.

Предложенная метрика объединяет два критически важных параметра для систем промышленного мониторинга – точность и время задержки. Точность определяется как отношение суммы корректно обнаруженных аномалий и корректно идентифицированных «нормальных» состояний к общему числу случаев [5]

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} 100\%,$$

где  $TP$  – истинно положительные (аномалии обнаружены верно);  $TN$  – истинно отрицательные (нормальные состояния верно идентифицированы);  $FP$  – ложные срабатывания (нормальное состояние ошибочно принято за аномалию);  $FN$  – пропущенные аномалии (аномалия не обнаружена).

Задержка характеризуется суммарным временем, затраченным на обработку, передачу и принятие решения, после чего происходит нормирование компонента

$$1 - \frac{\text{Latency}}{T_{\text{crit}}},$$

где  $T_{\text{crit}} = 30$  с – максимально допустимая задержка.

В таблице 2 представлены полученные результаты проведенного эксперимента.

### Заключение

Теоретический анализ и результаты компьютерного моделирования подтвердили, что корректная обработка данных датчиков производственно-технологического комплекса позволяет принципиально улучшить качество мониторинга. Комбинированный подход, сочетающий медианную фильтрацию для подавления импульсных помех и адаптивный фильтр Калмана для гауссовских шумов, обес-

печил снижение общей погрешности измерений до 0,9 % при сохранении времени обработки в пределах 12 мс.

Перспективы развития процедур моделирования производственно-технологического комплекса связаны с интеграцией нейроморфных алгоритмов обработки сигналов и использованием квантовых сенсоров, что позволит достичь принципиально нового уровня точности в системах промышленной диагностики.

#### *Список литературы*

1. Методы обработки первичных данных в задачах прогнозирования технического состояния БТС / Е. А. Мажайцев, Е. Г. Семенова, В. Ф. Дмитриев, М. С. Смирнова, И. И. Дементьев // *Гидроакустика*. – 2024. – Вып. 60(4). – С. 87–93.

2. Мажайцев, Е. А. Цифровые двойники в задачах мониторинга работоспособности производственно-технологических комплексов / Е. А. Мажайцев, Г. С. Устиновский, А. К. Садыров // *Материалы V конференции молодежного научно-инженерного центра для студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 170–173.

3. ISA Annual Report 2024. – URL : <https://programs.isa.org/> (дата обращения: 12.06.2025).

4. Назарьев, А. В. Технологическое обеспечение сборки на основе принципов выявления критичных требований к высокоточным изделиям / А. В. Назарьев, П. Ю. Бочкарев // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 66–77. doi: 10.23947/2687-1653-2024-24-1-66-77

5. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения = Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions : введен 2022-01-01. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с. URL : <http://gost.gtsever.ru/Data/758/75810.pdf> (дата обращения: 12.06.2025).

---

## **Development and Verification of a Digital Twin of Test Production and Technological Complexes**

© V. M. Balashov<sup>1</sup>✉, E. A. Mazhaitsev<sup>2</sup>, E. G. Semenova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*JSC Research and Production Enterprise Radar MMS, balashov\_vm@radar-mms.com, St. Petersburg, Russian Federation;*

<sup>2</sup>*Department of Information Systems and Software Engineering; Baltic State Technical University; VOENMEKH named after D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russian Federation*

**Keywords:** reliability; test equipment; modeling; reliability; production and technological complex.

**Abstract:** A hybrid model of a digital twin of industrial and technological complexes is proposed, combining methods of adaptive filtering of signals from measuring sensors, machine learning, and physical-statistical modeling. The model includes a three-level anomaly detection system based on the principal component analysis (PCA), LSTM networks, and cross-correlation analysis. Experimental testing of the proposed model on data obtained from a turbogenerator confirmed its effectiveness in predicting production and operational failures.

#### *References*

1. Mazhaytsev Ye.A., Semenova Ye.G., Dmitriyev V.F., Smirnova M.S., Dement'yev I.I. [Methods for Processing Primary Data in Problems of Forecasting the Technical Condition of Unmanned Vehicles], *Gidroakustika* [Hydroacoustics], 2024, is. 60(4), pp. 87-93. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Mazhaytsev Ye.A., Ustinovskiy G.S., Sadyrov A.K. *Materialy V konferentsii molodezhnogo nauchno-inzhenernogo tsentra dlya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Proceedings of the V Conference of the Youth Scientific and Engineering Center for Students, Postgraduates, and Young Scientists], St. Petersburg, 2025, pp. 170-173. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Available at: <https://programs.isa.org/> (accessed 12 June 2025).

4. Nazar'yev A.V., Bochkarev P.Yu. [Technological support of assembly based on the principles of identifying critical requirements for high-precision products], *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 66-77. doi: 10.23947/2687-1653-2024-24-1-66-77 (In Russ., abstract in Eng.)

5. GOST R 57700.37-2021. *Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions*, Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2021, 15 p. available at: <http://gost.gtsever.ru/Data/758/75810.pdf> (accessed 12 June 2025). (In Russ.)

---

## Entwicklung und Verifizierung eines digitalen Zwillings von Test-, Produktions- und Technologiekomplexen

**Zusammenfassung:** Es ist ein hybrides Modell eines digitalen Zwillings industrieller und technologischer Anlagen vorgestellt, das Methoden der adaptiven Filterung von Messsignalen, maschinelles Lernen und physikalisch-statistische Modellierung kombiniert. Das Modell umfasst ein dreistufiges System der Erkennung der Anomalien, das auf Hauptkomponentenanalyse (PCA), LSTM-Netzwerken und Kreuzkorrelationsanalyse basiert. Experimentelle Tests des Modells anhand von Daten eines Turbogenerators bestätigten seine Wirksamkeit bei der Vorhersage von Produktions- und Betriebsstörungen.

---

## Développement et vérification du jumelage numérique des composants de production et de technologie testés

**Résumé:** Est proposé un modèle hybride d'un jumeau numérique de complexes de production et de technologie, combinant des méthodes de filtrage adaptatif des signaux provenant de capteurs de mesure, des méthodes d'apprentissage automatique et des simulations physiques et statistiques. Le modèle comprend un système de détection des anomalies à trois niveaux basé sur la méthode des composants principaux (PCA), réseaux LSTM et l'analyse des corrélations croisées. La validation expérimentale du modèle proposé sur les données du turbogénérateur a confirmé l'efficacité de la prévision des défaillances de production et d'exploitation

---

**Авторы:** *Балаиов Виктор Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального конструктора по программно-целевому развитию, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Российская Федерация; *Мажайцев Евгений Александрович* – аспирант кафедры «Информационные системы и программная инженерия»; *Семенова Елена Георгиевна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и программная инженерия», ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.