

УДК 681.5:622.692.4

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.61.10.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.61.10.004)

## Формализация задачи интеллектуального мониторинга технического состояния магистральных насосных агрегатов как основы проактивного и адаптивного управления насосным парком нефтеперекачивающей станции

А.М. Астахов✉

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

**Резюме.** Исследование посвящено формализации задачи разработки методов и методик проактивного и адаптивного управления насосным парком нефтеперекачивающих станций для повышения эффективности эксплуатации в условиях минимизации отказов магистральных насосных агрегатов, а также снижения количества случаев остановки перекачки на технологическом участке магистрального трубопровода вследствие невозможности обеспечения станцией необходимого количества агрегатов в работоспособном состоянии. Развитие аналогичных методов связано с использованием классических подходов к обработке исторических данных, направленных на анализ коэффициента полезного действия и обработку оперативных телеметрических данных. Однако данный подход снижает эффективность управления вследствие ограниченности временного интервала анализа, а также не обеспечивает формирование результирующего управляющего воздействия, ориентированного на оперативное использование результатов оценки технического состояния. В исследовании определены критерии эффективности разрабатываемых методов и методик проактивного и адаптивного управления насосным парком. Разработана структурная схема управления насосным парком нефтеперекачивающей станции. Формализованная задача обеспечивает возможность последующей реализации методов и методик, направленных на комплексный анализ исторических и оперативных данных для управления насосным парком в контурах эксплуатации, системах автоматического включения резерва в рамках обеспечения безопасности, а также при формировании графиков технического обслуживания и ремонта.

**Ключевые слова:** мониторинг технического состояния, проактивное управление, адаптивное управление, магистральный насосный агрегат, насосный парк, нефтеперекачивающая станция, техническое состояние, трубопроводный транспорт.

**Для цитирования:** Астахов А.М. Формализация задачи интеллектуального мониторинга технического состояния магистральных насосных агрегатов как основы проактивного и адаптивного управления насосным парком нефтеперекачивающей станции. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(10). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2575> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.004

## Formalization of the task of intelligent monitoring of the technical condition of main pumping units as the basis for proactive and adaptive management of the pumping fleet of an oil pumping station

A.M. Astakhov✉

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation*

**Abstract.** This study focuses on formalizing the problem of developing methods and techniques for proactive and adaptive management of the pump fleet of an oil pumping station to improve operational efficiency while minimizing failures of mainline pump units, as well as reducing the number of instances where pumping is halted in the process section of the main pipeline due to the station's inability to maintain the required number of units in operational condition. The development of such methods involves the use of classical approaches to historical data processing, aimed at analyzing efficiency and processing real-time telemetry data. However, this approach reduces control efficiency due to the limited time interval of the analysis and also fails to generate a resulting control action oriented toward the operational use of technical condition assessment results. The study defines performance criteria for the methods and techniques being developed for proactive and adaptive control of the pump fleet. A structural diagram for controlling the pump fleet of an oil pumping station has been developed. The formalized problem enables the subsequent implementation of methods and techniques aimed at a comprehensive analysis of historical and operational data for managing the pump fleet in operational loops, in automatic reserve activation systems as part of safety measures, and in the development of maintenance and repair schedules.

**Keywords:** technical condition monitoring, proactive management, adaptive management, main pump unit, pump fleet, oil pumping station, technical condition, pipeline transportation.

**For citation:** Astakhov A.M. Formalization of the task of intelligent monitoring of the technical condition of main pumping units as the basis for proactive and adaptive management of the pumping fleet of an oil pumping station. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(10). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2575> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.004

## Введение

Актуальность исследования, посвященного формализации задачи проактивного и адаптивного управления насосным парком нефтеперекачивающей станции (НПС) на основе интеллектуального мониторинга технического состояния магистральных насосных агрегатов (МНА), обусловлена важностью данной задачи в рамках эксплуатации технологического участка магистрального трубопровода и обеспечения бесперебойной перекачки нефти и нефтепродуктов. Эксплуатация МНА сопровождается непрерывным мониторингом технического состояния, который реализуется посредством анализа технологических параметров, регистрируемых средствами телеметрии, и регулярного вычисления коэффициента полезного действия [1, 2]. Однако запаздывание управленческих решений, принимаемых на основе указанных подходов, наряду с ограниченной точностью прогнозирования не обеспечивает предотвращения отказов МНА, обусловленных внутренними деградационными процессами. Подобные отказы, в совокупности с отказами, вызванными внешними воздействиями, не позволяют обеспечить автоматизацию управления и снижают эффективность технологического участка при выполнении перекачки. В связи с этим продолжаются исследования, направленные на разработку новых, более эффективных методов [3, 4]. Однако, несмотря на их потенциальную результативность, они ограничены составом формируемых управляющих воздействий, осуществляя частичный комплекс мер по снижению внеплановых отказов [5, 6]. Исходя из описанных ограничений, данное исследование направлено на структуризацию и формализацию задачи, обеспечивающей комплексный подход к управлению насосным парком НПС с требуемым уровнем автоматизации и охватывающей все необходимые контуры управления, что позволит сформировать замкнутый комплекс мероприятий НПС в рамках управления, ориентированных на снижение отказов эксплуатируемых МНА. Объект исследования – магистральные насосные агрегаты нефтеперекачивающих станций. Предмет исследования – методы обработки информации и интеллектуальной поддержки при

принятии управленческих решений в условиях эксплуатации насосного парка нефтеперекачивающей станции.

### Материалы и методы

Основой формализации задачи мониторинга технического состояния и последующего проактивного управления сложными техническими объектами, которыми являются магистральные насосные агрегаты, и адаптивного управления сложной организационно-технической системой, которой является технологический участок магистрального трубопровода, состоящего из нефтеперекачивающих станций, является концепция пространства состояний. Объектом управления (ОУ) выступает насосный парк нефтеперекачивающей станции, представляющий собой множество из  $n$  магистральных насосных агрегатов,  $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$  (в стандартной конфигурации МНА  $n = 4$ ). В отличие от классической схемы стабилизации параметров технологического процесса, управляемой величиной данного объекта является не отдельный агрегат, а дискретная конфигурация насосного парка – распределение ролей между агрегатами, соответственно для любого дискретного момента времени  $k = 1, \dots, N$  каждый агрегат  $A_j$  находится в одном из взаимоисключающих эксплуатационных состояний:

$$\rho_k^{(j)} \in \{\text{«работа»}, \text{«резерв»}, \text{«ремонт»}\}, j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Вводятся индикаторные переменные  $r_k^{(j)}, z_k^{(j)}, m_k^{(j)} \in \{0, 1\}$  принадлежности агрегата к соответствующему состоянию,  $r_k^{(j)} + z_k^{(j)} + m_k^{(j)} = 1$ . Конфигурация эксплуатации насосного парка НПС задается матрицей состояний:

$$\Sigma_k = [r_k^{(j)}, z_k^{(j)}, m_k^{(j)}]_{j=\overline{1, n}}. \quad (2)$$

Техническое состояние  $j$ -го МНА описывается вектором параметров деградации его конструктивных узлов  $M_j$ :

$$X_k^{(j)} = (x_1, \dots, x_{M_j})_k^{(j)}, X_k = (X_k^{(1)}, \dots, X_k^{(n)}), \quad (3)$$

компоненты которого характеризуют фактическое техническое состояние отдельных элементов.

Вектор состояния частично наблюдаем через многоканальную систему телеметрии автоматической системы управления технологическим процессом (АСУТП). В отличие от допущения о стационарном гауссовом шуме, погрешность каналов телеметрии существенно негауссова, к примеру, при анализе виброскорости МНА возникает фоновый шум, сопутствуемый импульсно-гармонической составляющей в виде спектральных пиков, что отражается в распределении в соответствии с моделью Тьюки-Хьюбера:

$$V_k^{(j)} \sim (1 - \varepsilon)N(0, R_V) + \varepsilon \mathcal{H}_k^{(j)}, 0 \leq \varepsilon \ll 1, \quad (4)$$

где  $R_V$  – ковариация фонового гауссова шума,  $\mathcal{H}_k^{(j)}$  – компонента аномальных выбросов.

Эволюция вектора состояния под действием назначенной роли МНА и косвенные наблюдения в общем случае описываются нелинейной парой соотношений:

$$X_{k+1}^{(j)} = \varphi^{(j)}(X_k^{(j)}, \sigma_k^{(j)}, W_k^{(j)}), Y_k^{(j)} = f^{(j)}(X_k^{(j)}, V_k^{(j)}), \quad (5)$$

где  $\sigma_k^{(j)} = (r_k^{(j)}, z_k^{(j)}, m_k^{(j)})$  – роль эксплуатации МНА,  $W_k^{(j)}$  – флуктуационный шум процесса деградации.

Поскольку функционирование МНА в большинстве случаев реализуется на одном уровне мощности, производительность технологического участка магистрального трубопровода определяется комбинацией эксплуатируемых насосных агрегатов на каждой НПС данного технологического участка, а скорость деградации каждого агрегата, в свою очередь, определяется его эксплуатационным состоянием, причем процесс деградации происходит только при эксплуатации в режиме  $r_k^{(j)} = 1$ .

Для последовательных вычислительных схем решения задач прогнозирования и управления оказывается допустимой линеаризация нелинейных моделей состояния-наблюдения, что приводит модель к линеаризованному виду:

$$X_{k+1}^{(j)} = \Phi_{k+1/k}^{(j)} X_k^{(j)} + W_{k+1}^{(j)}, Y_k^{(j)} = H_k^{(j)} X_k^{(j)} + V_k^{(j)}, \quad (6)$$

где  $\Phi_{k+1/k}^{(j)}$  – переходная матрица (или матрица изохронных производных), определяющая эволюцию состояния МНА,  $H_k^{(j)}$  – якобиан, связывающий сенсорные наблюдения с параметрами состояния. На уровне насосного парка НПС эти матрицы блочно-диагональны:

$$\Phi_{k+1/k} = \text{diag}(\Phi_{k+1/k}^{(1)}, \dots, \Phi_{k+1/k}^{(n)}), H_k = \text{diag}(H_k^{(1)}, \dots, H_k^{(n)}), \quad (7)$$

что отражает условную независимость деградации агрегатов при заданной конфигурации  $\Sigma_k$ .

## Результаты

Ограниченная точность любой отдельно взятой методики, которая описывается вероятностной оценкой работоспособности агрегатов при анализе исторических данных, непреодолимостью границ вычислительной эффективности моделей искусственного интеллекта, а также несостоятельность гипотез о стационарности рядов наблюдений обуславливают гибридную интеллектуальную оценку технического состояния (ТС), объединяющую три взаимодополняющих источника информации: исторические данные о наработках узлов до отказа, исторические данные о последовательностях отказов с последующим ремонтом и оперативные данные телеметрии АСУТП. Обобщенным показателем ТС МНА принимается вероятность его работоспособности  $\hat{P}_j \in [0,1]$ , формируемая оператором гибридной интеллектуальной оценки:

$$\hat{P}_j = \Psi(\mathcal{D}_j^{\text{ист}}, \mathcal{D}_j^{\text{пос}}, Y_{k-L, k-1}^{(j)}), \quad (8)$$

где  $\mathcal{D}_j^{\text{ист}}$  – массив ретроспективных данных о наработке конструктивных узлов МНА до отказа, сформированный по результатам эксплуатационных наблюдений,  $\mathcal{D}_j^{\text{пос}}$  – массив ретроспективных данных о последовательности отказов с последующим ремонтом конструктивных узлов МНА,  $Y_{k-L, k-1}^{(j)}$  – скользящее окно оперативных наблюдений ограниченной длины  $L$ .

Оператор  $\Psi$  структурно реализуется как последовательное уточнение и корректировка оценки технического состояния МНА тремя методиками:

$$P_j^{(0)} \xrightarrow{\text{коррекция по } \mathcal{D}_j^{\text{пос}}} \tilde{P}_j \xrightarrow{\text{коррекция бинарной классификацией отказа при } \eta_j=1} \hat{P}_j, \quad (9)$$

где  $P_j^{(0)}$  – вероятностная оценка работоспособности МНА на основе интенсивности отказа, формируемой статистической моделью,  $\tilde{P}_j$  – вероятностная оценка работоспособности МНА, скорректированная с учетом скрытых корреляций отказов деталей на некотором временном интервале эксплуатации,  $\eta_j \in \{0,1\}$  – бинарный прогноз ближайшего отказа на малом временном интервале прогнозирования, формируемый моделью машинного обучения по оперативным данным [7]. Стоит отметить, что коррекция вероятностной оценки в (9) выполняется по правилу максимума: результирующей принимается наибольшая из оценок, сформированных применяемыми методиками.

Режим работы НПС, задаваемый планом перекачки технологического участка магистрального трубопровода, определяет число одновременно работающих пар агрегатов  $l \in \{1, 2\}$ , в каждой из которых присутствует агрегат с принадлежностью эксплуатационному состоянию  $r_k^{(j)} = 1$  и агрегат с принадлежностью эксплуатационному состоянию  $z_k^{(j)} = 1$ . Интегральным эксплуатационным показателем служит поток отказов и ожидаемое число внеплановых остановок НПС:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \mathbb{E}[v(0, t)], \Lambda(T) = \int_0^T \omega(t) dt, \quad (10)$$

где  $v(0, t]$  – число внеплановых остановок МНА в эксплуатационном состоянии,  $r_k^{(j)} = 1$ ,  $T$  – временной интервал маршрутного поручения технологического участка магистрального трубопровода, в который входит НПС,  $\Lambda(T)$  – ожидаемый поток отказов МНА.

Переход к проактивному управлению требует упреждающей оценки технического состояния насосного парка НПС. Вводится прогностический оператор, формирующий на скользящем окне наблюдений прогноз ТС всех МНА насосного парка НПС на некотором интервале времени  $\tau$ :

$$\mathcal{P}_{k+\tau/k}: (Y_{k-L, k-1}, Y_k) \rightarrow \tilde{Z}_{k+\tau} = \left\{ \tilde{P}_{k+\tau}^{(j)}, \hat{P}_{k+\tau}^{(j)}, \eta_{k+\tau}^{(j)} \right\}_{j=1, n}, k = L + 1, \dots, N, \quad (11)$$

где  $Y_{k-L, k-1}$  – скользящее окно наблюдений с момента  $k - L$  по  $k - 1$ ,  $\tilde{Z}_{k+\tau}$  – выходной прогнозируемый кортеж показателей ТС насосного парка НПС,  $k$  – область определения интервала анализа,  $N$  – интервал горизонта наблюдения.

Практическая значимость прогностического оператора оценивается опосредованно через эффективность управления, в котором он используется.

Управляющее воздействие обусловлено синтезом композитного управления:

$$U_k = (U_k^{\text{TOP}}, U_k^{\text{экспл}}, U_k^{\text{ABP}}), \quad (12)$$

объединяющего три контура, каждый из которых определен собственными входами и выходами, необходимых для достижения поставленных задач.

Контур планирования технического обслуживания и ремонта (ТОР) преобразует прогноз состояния насосного парка и план перекачки в график проведения ТОР с необходимым комплектом:

$$U_k^{\text{ТОР}}: (\tilde{Z}_{k+\tau}, Q^{\text{план}}) \rightarrow (t_{\text{рем}}^*, \Xi_{m+1}) = \left( \underset{t}{\operatorname{argmax}} \left\{ \bar{P} \mid \sum_{j \neq j^*} z_k^{(j)} \neq 0 \right\}, \Xi_{m+1}(j^*) \right), \quad (13)$$

где  $Q^{\text{план}}$  – план перекачки, определяющий число одновременно работающих пар агрегатов  $l \in \{1, 2\}$ ,  $t_{\text{рем}}^*$  – назначаемый момент времени вывода МНА в состояние  $m_k^{(j)} = 1$ , при котором обеспечивается снижение вероятности нарушения условий

резервирования,  $\Xi_{m+1}$  – прогнозируемый комплект заменяемых деталей, включая не входящие в комплект запасных частей и принадлежностей (ЗИП),  $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{P}_j$  – среднее значение работоспособности насосного парка НПС.

Стоит отметить, что контур планирования ТОР ориентирован на максимизацию  $\bar{P}$ , а не коэффициента готовности  $\bar{K}_r$  насосного парка, поскольку решаемой задачей является не только обеспечение снижения времени восстановления, являющегося основным компонентом коэффициента готовности, но и сохранение вероятностной характеристики безотказной работы. Однако в общем случае возможно рассмотрение коэффициента готовности как целевого параметра.

Контур проактивного управления насосным парком НПС основывается на выборе пар  $l$  МНА, формируя конфигурацию насосного парка на базе прогноза обобщенной работоспособности:

$$U_k^{\text{эспл.}}: \{\hat{P}_j(T)\}_{j=\overline{1,n}} \rightarrow \Sigma_k = \operatorname{argmin} \left\{ \Lambda(T) \mid |\delta_j| \leq \delta_{\text{доп}}, \sum_j r_k^{(j)} = l_k, \delta_j = \hat{P}_j - \bar{P} \right\}, \quad (14)$$

где  $\delta_j$  – отклонение работоспособности анализируемого МНА относительно средней работоспособности насосного парка НПС,  $\delta_{\text{доп}}$  – допустимый уровень отклонения работоспособности МНА от средней работоспособности насосного парка НПС.

Контур адаптивного управления системой включения резерва преобразует текущие параметры телеметрии и оценки ТС МНА в сигнал перехода на резервный агрегат:

$$U_k^{\text{ABP}}: (Y^{(j)}, \hat{P}_j) \rightarrow u^{(j)} = \operatorname{argmin}_{u \in \{0,1\}} \{P_{\text{лс}}(u) \mid P_{\text{зап}}(u) \leq \varsigma_{\text{доп}}\}, \quad (15)$$

где  $u^{(j)}$  – бинарный управляющий сигнал, который при  $u^{(j)} = 1$  приводит к отключению эксплуатируемого МНА и переходу на резервный в рамках пары, при  $u^{(j)} = 0$  продолжается эксплуатация МНА,  $P_{\text{лс}}(u)$  – вероятность ложного переключения на резервный МНА,  $P_{\text{зап}}(u)$  – вероятность запаздывания обнаружения действительного отказа,  $\varsigma_{\text{доп}}$  – допустимый уровень риска запаздывания обнаружения действительного отказа [8].

В качестве оценки точности в практике статистического анализа обычно используются оценка среднеквадратического отклонения (СКО) или, в более общем случае, полный квадрат ошибки (ПКО), в частности, для метода оценки ТС МНА применима мера Бриера [9]. Однако данный подход обладает характером косвенного оценивания, это обусловлено тем, что собственные показатели качества моделей прогнозирования применимы исключительно для обоснования математического результата, который не доказывает их практическую значимость. Это обосновывается тем, что повышение точности подобных моделей на малое значение, измеримое диапазоном процентов первых десяти чисел, могут не повлиять на фактическую корректность применяемых управляющих воздействий на сложную техническую систему. Несмотря на подобный фактор, применение критерия оценки эффективности интеллектуального метода мониторинга ТС МНА необходимо для обеспечения оценки согласованности используемых алгоритмов при их интегрировании, но результирующее воздействие метода на управление сложной технической системой будет осуществляться за счет использования оценки, опосредованной через оценки повышения эффективности методов и методик проактивного и адаптивного управления насосным парком НПС.

Для оценки эффективности методов и методик проактивного и адаптивного управления насосным парком НПС, следуя общей методике оценки эффективности

систем, будут применимы критерии эффективности, разделяемые на необходимые (критерий пригодности) и достаточные (критерий превосходства) [10, 11].

Методика контура проактивного управления ТОР будет эффективной по критерию пригодности, если она обеспечивает выполнение условия:

$$(t_{\text{рем}}^*, \Xi_{m+1}) \in \Omega^{\text{ТОР}} = \{(t, \Xi) \mid t \leq t_{\text{откл}}(j^*), \sum_{j \neq j^*} z_k^{(j)} \neq 0, \Xi_{\text{ЗИП}} \subset \Xi\}, \quad (16)$$

где  $\Omega^{\text{ТОР}}$  – область допустимых решений,  $t_{\text{откл}}(j^*)$  – прогнозируемый момент отказа агрегата  $j^*$ ,  $\Xi_{\text{ЗИП}}$  – комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей для проведения обслуживания и ремонта МНА.

Методика контура проактивного управления ТОР будет эффективной по критерию превосходства, если она обеспечивает выполнение условия:

$$Eff^{\text{ТОР}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\bar{P}_k - \bar{P}_k^0}{\bar{P}_k^0} > 0, \quad (17)$$

где  $\bar{P}_k^0$  – среднее значение работоспособности насосного парка НПС при использовании существующей модели проведения ТОР.

Метод контура проактивного управления эксплуатации насосного парка НПС для проведения перекачки в рамках маршрутного поручения технологического участка магистрального трубопровода будет эффективным по критерию пригодности, если он обеспечивает выполнение условия:

$$\Sigma_k \in \Omega^{\text{ЭКСПЛ}} = \{\Sigma \mid \sum_j r^{(j)} \geq l_k, \sum_j z^{(j)} \neq 0, |\delta_j| \leq \delta_{\text{доп}}, \delta_j = \hat{P}_j - \bar{P}\}, \quad (18)$$

где  $\Omega^{\text{ЭКСПЛ}}$  – область допустимых решений.

Метод контура проактивного управления эксплуатации насосного парка НПС для проведения перекачки в рамках маршрутного поручения технологического участка магистрального трубопровода будет эффективным по критерию превосходства, если он обеспечивает выполнение условия:

$$Eff^{\text{ЭКСПЛ}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\Lambda(T)_k^0 - \Lambda(T)_k}{\Lambda(T)_k^0} > 0, \quad (19)$$

где  $\Lambda(T)_k^0$  – ожидаемый поток отказов МНА при использовании существующей модели управления насосным парком НПС.

Методика контура адаптивного управления системой автоматического включения резерва будет эффективной по критерию пригодности, если она обеспечивает выполнение условия:

$$u^{(j)} \in \Omega^{\text{ABP}} = \{u \in \{0,1\} \mid P_{\text{зап}}(u) \leq \varsigma_{\text{доп}}\}, \quad (20)$$

где  $\Omega^{\text{ABP}}$  – область допустимых решений.

Методика контура адаптивного управления системой автоматического включения резерва будет эффективной по критерию превосходства, если она обеспечивает выполнение условия:

$$Eff^{\text{ABP}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{P_{\text{лс},k}^0 - P_{\text{лс},k}}{P_{\text{лс},k}^0} > 0, \quad (21)$$

где  $P_{\text{лс},k}^0$  – вероятность ложного переключения на резервный МНА при использовании существующей модели управления насосным парком НПС.

Управляющее воздействие  $U_k$  будет эффективным по критерию пригодности при одновременной принадлежности всех методов и методик своим областям:

$$(t_{\text{рем}}^*, \Xi_{m+1}) \in \Omega^{\text{ТОР}} \wedge \Sigma_k \in \Omega^{\text{ЭКСПЛ}} \wedge u^{(j)} \in \Omega^{\text{ABP}}, \quad (22)$$

а эффективным по критерию эффективности по неотрицательности взвешенной сверткой частных эффективностей:

$$Eff = \alpha_1 Eff^{TOP} + \alpha_2 Eff^{экспл} + \alpha_3 Eff^{ABP} \geq 0, \sum_i \alpha_i = 1. \quad (23)$$

Стоит отметить, что критерий превосходства применим только в условиях выполнения критерия пригодности, являясь критерием вторичной оценки улучшения предпринятого управляющего воздействия.

Рассмотрим структурную схему задачи (Рисунок 1). Процесс управления насосным парком НПС, состоящих из МНА строится на основе структурной модели  $\mathcal{M}$ , описывающей системы управления в виде множества  $\mathcal{M} = \langle U, X, Y \rangle$ , где  $U$  – множество управляющих воздействий,  $X$  – множество параметров состояния ОУ,  $Y$  – множество выходных параметров [12]. Входные процессы разделяются на параметры входных потоков  $\Pi = (\pi_1, \dots, \pi_{n\Pi})$ , управляющих воздействий.  $U = (u_1, \dots, u_{nU})$ , и воздействий среды функционирования  $W = (w_1, \dots, w_{nW})$ . Множество выходных процессов  $Y = (y_1, \dots, y_{nY})$  включает множество наблюдений, формируемых системой мониторинга МНА, основанной на многоканальной телеметрии, используемых для оценки технического состояния ОУ и формирования управляющих воздействий.

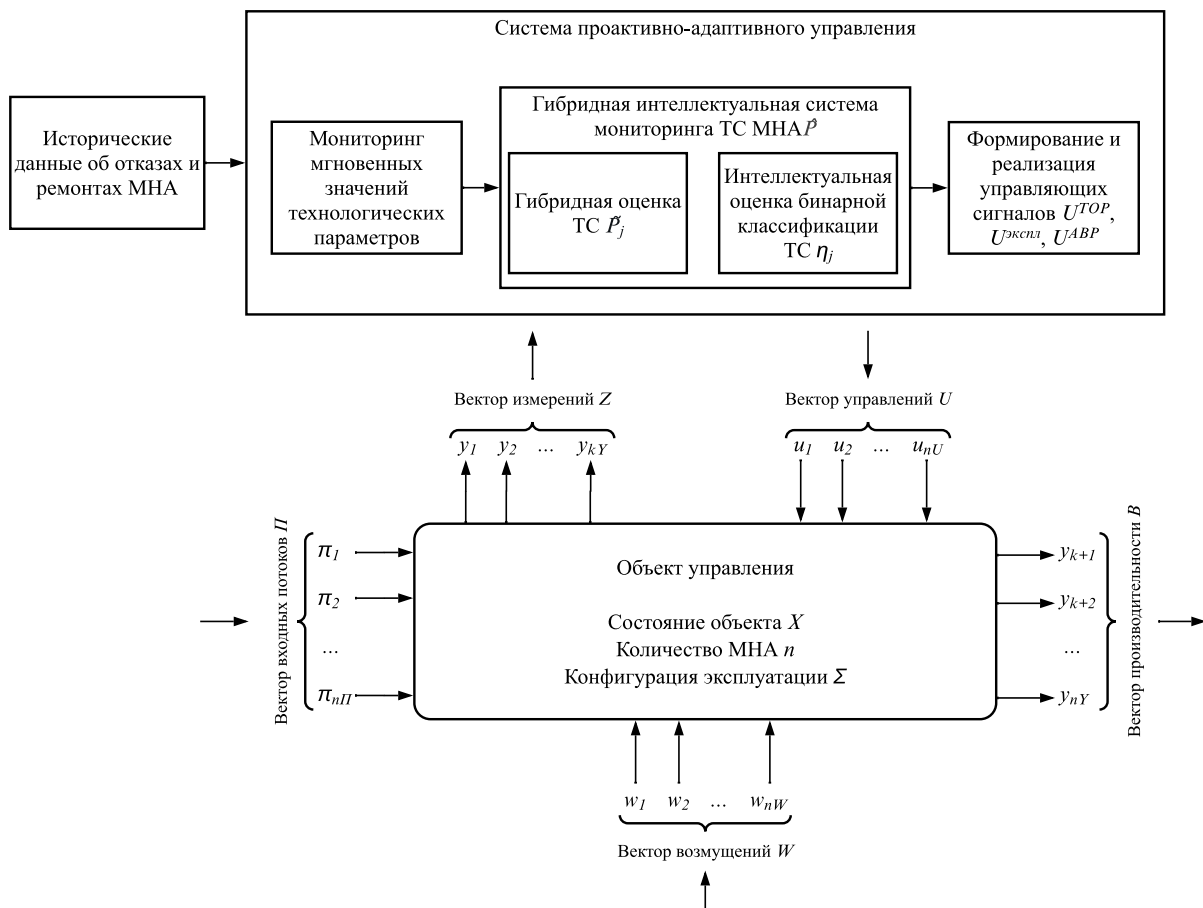


Рисунок 1 – Структурная схема управления насосным парком НПС  
Figure 1 – Block diagram of the pump fleet control of an oil pumping station

Ключевое отличие данной модели от традиционных структурных моделей состоит в том, что между мониторингом ТС МНА и формированием управляющего воздействия вводится двухступенчатый аналитический контур ТС, описанный ранее. В

Таблице 1 задана общая структура данных, формируемых системой контуров мониторинга ТС и управления насосным парком НПС.

Таблица 1 – Структура данных модели эксплуатации насосного парка НПС

Table 1 – Data structure of the pump fleet operation model of an oil pumping station

| Входные параметры                                                                                                                       | Параметры состояния                                                                                                                | Выходные параметры                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| – возмущающие параметры;<br>– параметры управления;<br>– параметры плана перекачки технологического участка магистрального трубопровода | – параметры деградации узлов МНА $X_k^{(j)}$ ;<br>– конфигурация ролей $\Sigma_k$ ;<br>– техническое состояние системы мониторинга | – параметры телеметрии;<br>– производительность НПС |

Стоит отметить, что вектор производительности нефтеперекачивающей станции  $B \in Y$  может быть интерпретирован через условие удовлетворения критерию  $l$  для установленного плана перекачки технологического участка магистрального трубопровода на основе маршрутного поручения, что является одним из ключевых условий функционирования НПС, управляемых напрямую через контур проактивного управления  $U_k^{\text{ЭКСП}}$ , а также косвенно через контуры адаптивного управления  $U_k^{\text{ABP}}$  и проактивного управления  $U_k^{\text{TOP}}$ .

### Заключение

Разработана математическая модель формализованной задачи разработки методов и методик проактивного и адаптивного управления насосным парком нефтеперекачивающих станций для повышения эффективности эксплуатации в условиях минимизации отказов магистральных насосных агрегатов, а также снижения количества случаев остановки перекачки на технологическом участке магистрального трубопровода вследствие невозможности обеспечения станцией необходимого количества агрегатов в работоспособном состоянии.

Обоснована необходимость проведения гибридного мониторинга технического состояния МНА, обеспечивающего анализ оперативных и исторических данных для получения детальной оценки ТС, позволяющего применить во всех контурах управления насосным парком НПС.

Разработаны и формализованы контуры управления насосным парком НПС, формирующие комплекс мероприятий, направленных на снижение отказов эксплуатируемых МНА с описанием условий эффективности по критерию пригодности и превосходства.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Кудряшов А.А., Харченко М.В., Дема Р.Р., Амиров Р.Н., Латыпов О.Р., Байрамуков Р.А. Разработка программы анализа текущего состояния гидравлического оборудования дроссировочного стана на основании анализа виброакустических шумов. *Вестник машиностроения*. 2025;104(1):12–15. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-1-12-15>  
Kudryashov A.A., Kharchenko M.V., Dema R.R., Amirov R.N., Latypov O.R., Bairamukov R.A. Development of a program of analysis of the current state of hydraulic equipment of a temper mill based on the analysis of vibroacoustic noise. *Vestnik mashinostroeniya*. 2025;104(1):12–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-1-12-15>

2. Популова Т.П., Минко Б.С. Прогнозирование отказа установок электроцентробежных насосов на основе косвенных показателей. *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2024;(6):119–135. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2024-6-119-135>  
Populova T.P., Minko B.S. Electric centrifugal pump unit prediction failure based on indirect indicators. *The Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2024;(6):119–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2024-6-119-135>
3. Ляпичев Д.М., Никулина Д.П., Фильченкова А.А. Практические аспекты применения систем мониторинга и предиктивной аналитики газоперекачивающих агрегатов. *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина*. 2023;(2):98–108.  
Lyapichev D.M., Nikulina D.P., Filchenkova A.A. Practical aspects of application of monitoring systems and predictive analytics systems of gas pumping units. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2023;(2):98–108. (In Russ.).
4. Коленчуков О.А., Бухтояров В.В., Шепета Н.А., Башмур К.А., Сергиенко Р.Б. Классификация технического состояния насосного агрегата с использованием интеллектуальной идентификации неисправностей. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2024;14(1):36–47. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-36-47>  
Kolenchukov O.A., Bukhtoyarov V.V., Shepeta N.A., Bashmura K.A., Sergienko R.B. Classification of technical condition of pumping unit based on intelligent fault identification. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2024;14(1):36–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-36-47>
5. Будзуляк Б.В., Лопатин А.С., Ляпичев Д.М. Удаленный мониторинг и предиктивная аналитика технического состояния газоперекачивающих агрегатов. *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина*. 2025;(4):99–108.  
Budzulyak B.V., Lopatin A.S., Lyapichev D.M. Remote monitoring and predictive analytics of the technical condition of gas pumping units. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2025;(4):99–108. (In Russ.).
6. Разбойников А.А., Земенкова М.Ю., Чижевская Е.Л., Уктамбоев Ж.Х., Пономарева Т.Г., Шабаров А.Б. Контроль и диагностика работы насосного оборудования магистральных нефтепроводов. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2025;(6):101–116. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2025-6-101-116>  
Razboynikov A.A., Zemenkova M.Y., Chizhevskaya E.L., Uktamboev J.K., Ponomareva T.G., Shabarov A.B. Control and diagnostics of pumping equipment operation in main oil pipelines. *Oil and Gas Studies*. 2025;(6):101–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2025-6-101-116>
7. Астахов А.М. Метод комбинирования машинного обучения и статистического анализа в задаче мониторинга технического состояния магистральных насосных агрегатов. В сборнике: *Информационные технологии и технические средства управления (ICST-2025): Материалы IX Международной научной конференции, 07–11 октября 2025 года, Гомель, Беларусь*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2025. С. 357–359.
8. Astakhov A., Chernenkaya L. Automatic reserve activation system using technical condition assessment of operating equipment. In: *2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*

- (APEIE), 14–16 November 2025, Novosibirsk, Russia. IEEE; 2025. <https://doi.org/10.1109/APEIE66761.2025.11289438>
9. Brier G.W. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Monthly Weather Review*. 1950;78(1):1–3.
10. Юсупов Р.М., Мусаев А.А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий. *Труды СПИИРАН*. 2017;(2):5–34. <https://doi.org/10.15622/sp.51.1>  
Yusupov R., Musaev A. Efficiency of Information Systems and Technologies: Features of Estimation. *SPIIRAS Proceedings*. 2017;(2):5–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.51.1>
11. Юсупов Р.М., Мусаев А.А. Проблема оценивания эффективности информационных технологий. В сборнике: *Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018): Материалы конференции, 02–04 октября 2018 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; 2018. С. 11–20.  
Yusupov R.M., Musaev A.A. The problem of evaluating the effectiveness of information technology. In: *Information Technologies in Management: Conference proceedings, 02–04 October 2018, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: Kontsern "TSNII "Elektropribor"; 2018. P. 11–20. (In Russ.).
12. Брайсон А., Хо Ю-Ши. *Прикладная теория оптимального управления: Оптимизация, оценка и управление*. Москва: Мир; 1972. 544 с.  
Bryson A.E., Ho Yu-Chi. *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. Moscow: Mir; 1972. 544 p. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Астахов Артур Михайлович**, аспирант, **Astakhov A. Mikhailovich**, Postgraduate, ассистент, Санкт-Петербургский Assistant Lecturer, Peter the Great St. Petersburg политехнический университет Петра Polytechnic University, St. Petersburg, the Великого, Санкт-Петербург, Российская Russian Federation. Федерация.  
e-mail: [astahov\\_am@spbstu.ru](mailto:astahov_am@spbstu.ru)  
ORCID: [0009-0000-4333-6354](https://orcid.org/0009-0000-4333-6354)

*Статья поступила в редакцию 13.07.2026; одобрена после рецензирования 23.09.2026; принята к публикации 12.10.2026.*

*The article was submitted 13.07.2026; approved after reviewing 23.09.2026; accepted for publication 12.10.2026.*