

Ковалёв Дмитрий Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; e-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78127865366; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств.

Имаев Дамир Хабибович – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: damir.imaev@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78122343798; д.т.н.; профессор кафедры автоматики и процессов управления.

Душин Сергей Евгеньевич – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: dushins@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78122343798; д.т.н.; профессор кафедры автоматики и процессов управления.

Kovalev Dmitrii Aleksandrovich – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; e-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru; Saint Petersburg Russia; phone: +78127865366; cand. of eng. sc.; associate professor; head of the Department of Automation of Technological Processes and Production.

Imaev Damir Habibovich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin); e-mail: damir.imaev@mail.ru; Saint Petersburg Russia; phone: +78122343798; dr. of eng. sc.; professor of the Department of Automation and Control Processes.

Dushin Sergey Evgenievich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin); e-mail: dushins@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78122343798; dr. of eng. sc.; professor of the Department of Automation and Control Processes.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-241-249

А.В. Мартиросян, Д.В. Ромашин

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ И СЕПАРАЦИИ ГАЗА

Представлена концепция адаптивного управления при разделении природного газа. Применяемые на практике системы управления, как правило, основаны на фиксированных алгоритмах регулирования и не учитывают динамическое изменение физико-технических и эксплуатационных параметров, что приводит к снижению качества сепарации и росту энергозатрат. В статье описан подход сочетания системного анализа и метод Парето. Целью работы является разработка концепции адаптивного управления процессом подготовки природного газа на основе системного анализа. Недавние исследования показывают, что методы, основанные на данных, позволяют более точно настраивать параметры, лучше реагировать на колебания исходного газа и повышать эффективность удаления примесей. Для достижения поставленной цели в работе решены задачи выявления и классификации факторов, влияющих на качество и экономичность сепарации газа, а также формирования их взаимосвязей в рамках единой концептуальной модели управления. Особое внимание уделяется влиянию точного контроля ключевых параметров, таких как давление, температура и расход, на эффективность этих процессов. Анализ последних исследований демонстрирует растущее использование нейронных сетей и моделей машинного обучения в очистке газа для прогнозирующего управления, обнаружения аномалий и оптимизации рабочих параметров. Сравнительная оценка классических ПИД-регуляторов, нечетких, адаптивных и нейронных методов управления подтверждает преимущества интеллектуального регулирования с точки зрения стабильности, адаптивности и энергоэффективности. Основным результатом работы является обоснование ключевых факторов, определяющих эффективность сепарации, среди которых наибольшее влияние оказывают давление, температура и расход газа. Полученная модель формирует методологическую основу для разработки интеллектуальных и адаптивных систем управления процессом подготовки газа.

Сепарация газа; очистка газов; адаптивное управление; нечеткая логика; нейронные сети; машинное обучение; оптимизация процессов; интеллектуальные системы; метод Парето.

A.V. Martirosyan, D.V. Romashin

CONCEPTUAL MODEL OF FACTORS INFLUENCING THE EFFICIENCY OF GAS PREPARATION AND SEPARATION PROCESS

The paper presents the concept of adaptive control in natural gas separation. The control systems used in practice are usually based on fixed control algorithms and do not consider dynamic changes in physical, technical and operational parameters, which leads to a decrease in separation quality and an increase in energy consumption. The article describes the approach of combining system analysis, modeling and the Pareto method. This paper presents a concept for adaptive control in natural gas separation. Control systems used in practice are typically based on fixed control algorithms and do not account for dynamic changes in physical, technical, and operational parameters, which leads to reduced separation quality and increased energy costs. This paper describes an approach combining systems analysis and the Pareto method. The aim of this paper is to develop a concept for adaptive control of the natural gas treatment process based on systems analysis. Recent studies demonstrate that data-driven methods enable more precise parameter adjustment, better responsiveness to raw-gas fluctuations and improved impurity removal efficiency. To achieve this goal, this paper addresses the challenges of identifying and classifying factors affecting the quality and efficiency of gas separation, as well as integrating their relationships within a unified conceptual control model. Particular attention is paid to the impact of precise control of key parameters, such as pressure, temperature, and flow rate, on the efficiency of these processes. An analysis of recent research demonstrates the growing use of neural networks and machine learning models in gas purification for predictive control, anomaly detection, and optimization of operating parameters. A comparative evaluation of classic PID controllers, fuzzy, adaptive, and neural control methods confirms the advantages of intelligent control in terms of stability, adaptability, and energy efficiency. The main result of this study is the substantiation of key factors determining separation efficiency, among which pressure, temperature, and gas flow rate have the greatest impact. The resulting model forms a methodological basis for the development of intelligent and adaptive control systems for gas purification processes.

Gas separation; gas treatment; adaptive control; fuzzy logic; neural networks; machine learning; process optimization; intelligent systems; Pareto method.

Введение. Нефтегазовая отрасль играет ключевую роль в мировой экономике, обеспечивая более половины потребляемой энергии. Природный газ, как самое чистое ископаемое топливо, является важным ресурсом для перехода к новым энергетическим технологиям. В условиях усложняющейся добычи и растущих требований к качеству газа необходимо совершенствовать методы его очистки и разделения [1, 2].

На газоперерабатывающих предприятиях процесс сепарации природного газа остаётся одним из наиболее энергоёмких и критичных к качеству управления этапов. Существующие системы автоматизации, как правило, используют жёсткие алгоритмы регулирования, не адаптирующиеся к изменению свойств сырья и внешних условий. Это приводит к росту содержания примесей в товарном газе, увеличению эксплуатационных затрат и сокращению ресурса оборудования. В то же время современные методы интеллектуального управления, способные решить указанные проблемы, требуют предварительного системного анализа факторов, влияющих на процесс. Настоящая работа посвящена созданию такой аналитической основы.

В качестве примера предлагается рассмотреть процесс сепарации газа. Сепарация – процесс разделения (отделения, разъединения) твёрдой, жидкой и газовой (паровой) фаз потока природного газа с последующим извлечением из него твёрдой и жидкой фаз. Сепарация газа предназначена для предохранения от попадания влаги и твёрдых частиц в промышленные газосборные сети и технологическое оборудование газовых и газоконденсатных месторождений.

Добываемый газ содержит механические (частицы горных пород, строительный шлак, продукты коррозии и эрозии, жидкий конденсат и воду) и химические (сероводород, сероуглерод, меркаптан, азот, гелий, углекислый газ, сульфиды и дисульфиды) примеси. Эти примеси могут оказывать негативное воздействие на оборудование, приводя к увеличению случаев отказов, аварий и засоров твердыми частицами. Таким образом, повышенное количество примесей в потоке способно ускорить износ и частоту обслуживания оборудования, увеличивая эксплуатационные расходы.

Несмотря на непрерывную модернизацию технологического комплекса, логика управления многих установок остается неизменной. Сейчас на рассматриваемом объекте алгоритм управления не может адаптироваться к изменениям состава газа и колебаниям температуры окружающей среды. В последствии это приводит к снижению эффективности сепарации, увеличению содержания примесей на выходе и повышению энергопотребления для повторной очистки газа [3, 4]. Решить данную задачу на газоперерабатывающих заводах позволяет автоматизированные системы управления, которые непрерывно измеряют, анализируют и корректируют параметры в режиме непрерывного мониторинга. Меры управления направлены на стабилизацию технологического потока и улучшение очистки газа от жидких и механических примесей.

Для эффективного регулирования давления используют датчики давления передают сигналы контроллеру, который сравнивает текущее значение с заданным. При повышении давления контроллер посылает управляющий сигнал на частичное открытие клапана, тем самым увеличивая расход и снижая внутреннее давление установки. И наоборот, при снижении давления клапан закрывается. Этот принцип управления основан на пропорционально-интегрально-дифференциальном (ПИД) законе управления, обеспечивающем плавное и стабильное управление параметрами и предотвращающем колебания. Регулирование температуры направлено на обеспечение условий, необходимых для эффективного разделения газожидкостной смеси. Мониторинг осуществляется с помощью терморезисторных датчиков или термопар, установленных в критических зонах оборудования. Эффект регулирования достигается путем изменения расхода хладагента или охлаждающей жидкости через регулирующие клапаны. При повышении температуры подача охлаждающей жидкости увеличивается; при понижении температуры подача охлаждающей жидкости уменьшается.

Для эффективного регулирования уровня жидкости в сепараторе используют уровнемеры поплавкового, которые позволяют предотвратить переполнения и прорыва жидкости в газовую линию. При достижении предельно допустимого уровня контроллер подаёт сигнал на открытие дренажного клапана или включение насоса для отвода конденсата в сборную ёмкость. После снижения уровня клапан автоматически закрывается. Для контроля расхода газа используют вихревые или диафрагменные расходомеры, которые позволяют равномерно осуществлять поступление газового потока в сепаратор.

Все управляющие воздействия выполняются в замкнутом цикле автоматического регулирования. Данный процесс протекает измерительные устройства фиксируют текущее состояние процесса, контроллер анализирует отклонение параметров от заданных уставок и формирует управляющий сигнал для исполнительных механизмов. Исполнительные устройства (клапаны, насосы, дросселирующие узлы) изменяют состояние технологического потока, после чего обновлённые значения снова поступают в систему обратной связи. Для газоперерабатывающих предприятий важно адаптировать управление параметрами, такими как давление, температура и расход газа. способы регулирования обеспечивают стабильность, но не позволяют менять параметры при изменении сырья или внешних факторов (состав сырья, температура окружающей среды) [5, 6]. Чтобы решить эту задачу, нужен системный подход, объединяющий анализ связей между параметрами, прогнозирование и оценку факторов [7]. Современные исследования демонстрируют, что применение интеллектуальных технологий и системного анализа позволяет рассматривать процесс подготовки газа как задачу с множеством факторов. Эффективность этого процесса зависит от различных технических, термодинамических и эксплуатационных аспектов [8, 9]. Для своего исследования мы использовали метод Парето. Этот метод помогает определить приоритеты среди параметров по степени их влияния на конечный результат и выделить ключевые факторы, определяющие качество подготовки газа [7, 8]. Применение такого подхода позволяет перейти от управления отдельными параметрами к комплексной системе регулирования, основанной на приоритетах и обратной связи [9, 10].

Существующие системы автоматического регулирования на газоперерабатывающих предприятиях построены по принципу поддержания заданных уставок с помощью ПИД-законов. Однако, как показал анализ эксплуатационных данных, такие системы де-

монстрируют снижение эффективности при изменении состава сырья, колебаниях температуры окружающей среды и нестабильности подачи газа. Это приводит к росту содержания примесей на выходе и увеличивает энергопотребление на повторную очистку.

Альтернативой является применение адаптивных и интеллектуальных методов управления, которые способны перестраивать стратегию регулирования в зависимости от текущих условий. В литературе активно обсуждаются подходы на основе нечёткой логики, нейронных сетей и гибридных архитектур, однако их практическое внедрение сдерживается отсутствием системных моделей, связывающих технологические параметры с показателями эффективности. Данное исследование направлено на формирование такой методологической основы.

Цель работы – создать концептуальную модель адаптивного управления процессом подготовки газа.

Для этого нужно решить следующие задачи:

1. Изучить современные подходы к управлению процессом подготовки газа и выявить их ограничивающие факторы, влияющие на качество сепарации [11].
2. Определить, какие факторы влияют на качество и эффективность сепарации газа [12].
3. Разработать концептуальную модель управления, показывающую, как связаны параметры технологического процесса.
4. Оценить приоритетность факторов методом Парето, используя статистические данные и мнения экспертов.

Объект исследования – процесс сепарации природного газа. Предмет исследования – методы системного анализа и оценки факторов, влияющих на управление параметрами подготовки газа [13].

Концептуальная модель позволяет определить взаимосвязь между параметрами (давление, температура, расход газа) и внешними воздействиями. Это является основой для создания адаптивных систем регулирования [14, 15].

Практическая польза заключается в том, что разработанная модель позволит упростить параметры процесса, выявить наиболее важные факторы, влияющие на качество сепарации [16]. Это позволит определить дальнейшие задачи для совершенствования существующих систем управления. В перспективе данное решение можно интегрировать в состав комплексных интеллектуальных систем [17].

Материалы и методы. Методологическая часть исследования строится на применении системного анализа в процессе подготовки природного газа. Этот метод рассматривает объекты как совокупность взаимосвязанных элементов: сырье, оборудование, параметры управления, внешние факторы и показатели эффективности.

На данном этапе работы основное внимание направлено на создание концептуальной модели, которая будет служить теоретическим основанием для разработки математической модели и алгоритмов адаптивного управления. Цель модели – интегрировать физико-технические, организационные и информационные аспекты, влияющие на эффективность подготовки газа к сепарации [18].

Исследование основано на сочетании методов системного анализа, структурного моделирования и оценки приоритетов факторов по принципу Парето. Такой подход позволяет не только выявить ключевые параметры, определяющие качество технологического процесса, но и обосновать их взаимосвязь в контуре управления [19].

Согласно системной методологии, процесс подготовки газа рассматривается как многоуровневая динамическая система, в которой выделяются:

- ♦ входные параметры – давление, температура, состав сырья, расход газа и жидкости;
- ♦ управляемые переменные – давление в сепараторе, расход газа, температура теплообменников [20];
- ♦ возмущающие воздействия – изменения состава сырья, внешняя температура, нестабильность подачи;
- ♦ результирующие показатели (KPI) – степень очистки, потери конденсата, энергоёмкость и стабильность режима.

Взаимосвязи параметров анализировались с использованием элементов системного структурирования: выделения ключевых факторов, построения их иерархии и определения направлений влияния [21].

Далее, будут описаны этапы разработки концептуальной модели выполнялась в несколько последовательных этапов:

1. Сбор и анализ исходной информации. Были изучены технические характеристики сепараторов, данные технологических измерений (давление, температура, расход газа) и результаты промысловых наблюдений [22]. Дополнительно рассматривались исследования отечественных и зарубежных авторов по управлению процессами подготовки газа [23, 24].

2. Систематизация факторов. На основе анализа выделена совокупность факторов, влияющих на эффективность сепарации, сгруппированных по блокам: физико-технические параметры (температура, давление, расход газа); конструктивные и эксплуатационные особенности оборудования; характеристики сырья (состав, влажность, содержание примесей); организационно-технологические условия (режим работы, частота регулирования, квалификация персонала); внешние воздействия (температура окружающей среды, изменения дебита).

В дальнейшем была составлена структурированная система факторов, влияющих на качественную сепарацию газа – то есть на минимизацию количества примесей (жидких, механических, химических). Данные факторы будут использоваться для экспертного опроса и оценки значимости [25].

Наиболее значимые параметры определены по диаграмме Парето (рис. 1). Согласно принципу Парето, наиболее значимые параметры имеют вес $\lambda_i \geq 0,01$. Выбор метода Парето для ранжирования факторов обусловлен тем, что технологический процесс сепарации характеризуется большим числом взаимосвязанных параметров, многие из которых дублируют влияние друг друга. Применение метода Парето позволяет выделить ограниченное множество наиболее значимых факторов, определяющих до 80% суммарного эффекта, что критически важно для последующего построения управляющих моделей – сокращение размерности задачи снижает вычислительную сложность и повышает робастность системы. Кроме того, метод Парето хорошо сочетается с экспертными оценками и статистическими данными, что делает его применимым на начальных этапах исследования при отсутствии больших объемов промышленных данных.



Рис. 1. Диаграмма Парето

Согласно данному соотношению построена концептуальная модель подготовки газа к сепарации (рис. 2).

На основе разработанной концептуальной модели на следующем этапе предполагается построение адаптивной системы управления, включающей следующие функциональные блоки: Блок идентификации состояния – предназначен для оценки текущих значений давления, температуры, расхода и состава сырья на основе данных датчиков и корреляционных моделей. Блок прогнозирования – планируется использование рекуррентных нейронных сетей (LSTM) или уравнений состояния для краткосрочного прогноза изменения выходных показателей при текущих управляющих воздействиях. Блок оптимизации уставок – предполагается решение многокритериальной задачи (по Парето) с целевыми функциями:

минимизация содержания примесей, минимизация энергозатрат, максимизация стабильности режима. Блок нечёткого управления – на основе базы правил вида «ЕСЛИ ... ТО ...» предполагается коррекция уставок ПИД-регуляторов или прямое управление исполнительными механизмами. Детальная реализация перечисленных блоков, включая выбор конкретных алгоритмов и их настройку, является предметом дальнейших исследований.

Математический аппарат для оценки качества прогнозирования. При проведении исследования для количественной оценки точности прогнозирования параметров сепарации использовались следующие метрики, а именно MAE, RMSE, MAPE.

MAE (Mean Absolute Error) – средняя абсолютная ошибка:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|. \quad (1)$$

RMSE (Root Mean Square Error) – среднеквадратичная ошибка:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (2)$$

R^2 – коэффициент детерминации, показывающий долю объяснённой дисперсии:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (3)$$

MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – средняя абсолютная процентная ошибка:

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|. \quad (4)$$

Кроме того, учитывая специфику технологического процесса, предлагается использовать специализированную функцию потерь EquipmentAwareLoss, которая штрафует прогнозы, попадающие в критические зоны (например, давление выше 8 МПа или температура выше 150°C). Разработанная функция потерь имеет вид:

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\alpha_i \cdot |y_i - \hat{y}_i| + \beta \cdot \text{penalty}_{\text{critical}}(y_i, \hat{y}_i) \right). \quad (5)$$

Планируемый сценарий апробации. В качестве сравнительного базиса будет использоваться классический ПИД-регулятор, настроенный на номинальный режим. Ожидается, что адаптивная система позволит сократить время переходных процессов и снизить амплитуду колебаний давления по сравнению с традиционным подходом.

В рамках подготовки к реализации указанного сценария авторами уже проведён сравнительный анализ методов прогнозирования технологических параметров сепарации на основе промышленных данных. Из 37868 исходных записей после многоэтапной фильтрации сформирована репрезентативная выборка из 928 записей, соответствующих штатному режиму работы. Предварительное тестирование показало, что: Random Forest обеспечивает наивысшую точность прогнозирования давления ($R^2 = 0,889$) и температуры ($R^2 = 0,864$, MAPE = 1,41%); XGBoost показывает наилучшие результаты для расхода газа ($R^2 = 0,422$, MAE = 199,2 м³/ч); классическая модель ARIMA дала отрицательные значения R^2 для всех параметров, что подтверждает необходимость использования нелинейных методов машинного обучения для данного технологического процесса. Полученные результаты создают основу для интеграции прогнозных моделей в контур адаптивного управления и будут использованы при имитационном моделировании.

Концептуальная модель, полученная на данном этапе, не претендует на завершённую прикладную реализацию. Её задача – сформировать методологическую основу для последующего построения математических моделей, имитационных экспериментов и алгоритмов адаптивного управления.

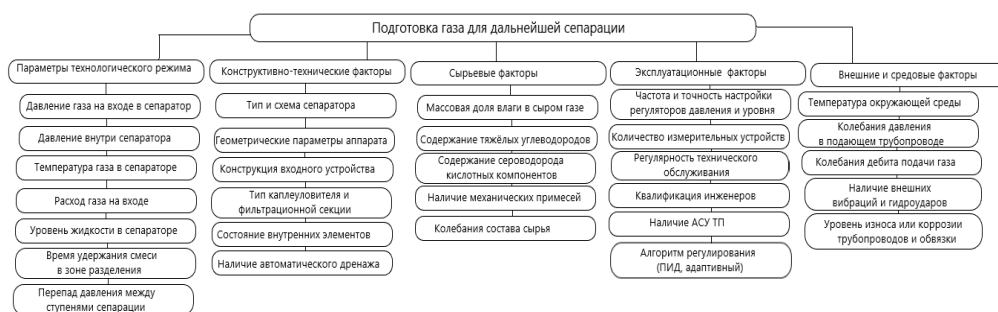


Рис. 2. Концептуальная модель управляемых процессов подготовки газа к сепарации

Заключение. Проведённое исследование позволило сформировать системное представление о совокупности факторов, влияющих на качество процессов сепарации и подготовки газа. Разработана концептуальная модель, отражающая структуру взаимосвязей между физико-техническими, конструктивными, сырьевыми, эксплуатационными и внешними параметрами. Модель базируется на принципах системного анализа и предназначена для определения ключевых направлений повышения эффективности подготовки газа.

Установлено, что наибольшее влияние на минимизацию примесей и стабильность технологического процесса оказывают параметры технологического режима (давление, температура, расход газа). Взаимосвязь этих факторов формирует основу для построения адаптивной системы управления процессом подготовки газа, способной учитывать изменчивость состава сырья и внешние условия эксплуатации. Для верификации модели применялись методы экспертных оценок. Значимость факторов подтверждена статистическими критериями – коэффициентами конкордации и корреляции Пирсона, что позволило уточнить устойчивость выявленных связей.

В дальнейшем предполагается разработка архитектуры адаптивного регулятора, включающей блоки идентификации, прогнозирования, оптимизации и нечёткого управления, а также проведение имитационного моделирования для оценки её эффективности по сравнению с классическим ПИД-регулятором в условиях переменного состава сырья. Результаты моделирования позволят уточнить количественные показатели улучшения стабильности и энергоэффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zemenkova M.Y., Chizhevskaya E.L., & Zemenkov Y.D. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies, *Journal of Mining Institute*, 2022, 258, pp. 933-944. Available at: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.105>.
2. Ereemeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels, *Sci Rep.*, 2023, 13, 14956. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41962-0>.
3. Qiu M., Ji Z., & Ma L. An energy-efficiency evaluation method for high-sulfur natural gas purification system using artificial neural networks and particle swarm optimization, *International Journal of Energy Research*, 2022, 46 (3). Available at: <https://doi.org/10.1002/er.7376>.
4. Li Y., Qin G., Xiong Z., & Fan L. Gas-liquid separation performance of a micro axial flow cyclone separator, *Chemical Engineering Science*, 2022, 249. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117234>.
5. Martirosyan A., Ilyushin Y., Afanaseva O., Kukharova T., Asadulagi M., & Khloponina V. 'Development of an Oil Field's Conceptual Model', *International Journal of Engineering*, 2025, 38 (2), pp. 381-388. Available at: <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.02b.12>.
6. Urzakov K.R., Belozarov V.V., & Latypov B.M. Study of the dynamics for gas accumulation in the annulus of production wells, *Journal of Mining Institute*, 2021, 250, pp. 606-614. Available at: <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.14>.
7. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., & Beloev I. Review of Operating Conditions, Diagnostic Methods, and Technical Condition Assessment to Improve Reliability and Develop a Maintenance Strategy for Electrical Equipment, *Energies*, 2025, 18 (21), 5832. Available at: <https://doi.org/10.3390/en18215832>.

8. Safiullin R.N., Zalyubovskiy A.F., Safiullin R.R., Sorokin K.V., & Avksentiev S.Y. An Algorithm to Process Big Data of Remote Technical Condition Assessment System for Mining Machines, *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 2026, 39(3), pp. 613-622. Available at: <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.03c.05>.
9. Tian J., Hu Y., Lv J., Feng Z., & Song W. Modelling and performance analysis of power system in gas engine-driven heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 2023, 223. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120015>.
10. Yang Z., Li X., Xiang Q., He Q., Faber M.H., Zio E., Su H., & Zhang J. A resilience evaluation method of natural gas pipeline system based on uncertainty analysis, *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 177. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.058>.
11. Afanaseva O.V., & Tulyakov T.F. Analysis of the effectiveness of traditional and modern technologies for monitoring power transmission lines, *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2025, pp. 182-188. Available at: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-4-182-188>.
12. Li X.P., Shang D.Y., Li F.J., & Cao W.L. Dynamic Modeling and DME Evaluation of Power Transmission Line Inspection Robots, *Journal of Northeastern University*, 2020, 41, pp. 1280-1284. Available at: <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2020.09.011>.
13. Chen M., Tian Yu., & Xing Sh. (2021). Environment Perception Technologies for Power Transmission Line Inspection Robots, *Journal of Sensors*. 1. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/5559231>. EDN XLWPAO.
14. Mammadov Ja.F., Valiyeva B., Huseynova A.S.G., & Hasanova Ye.M.G. Development of diagnostic subsystem for manufacturing active elements in instrument-making industry, *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2022, 1, pp. 16-21. Available at: <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-1-16-21>. EDN JPEWZU.
15. Mal'Tsev P.A., Shatilova N.A., Abramkin S.E., & Podkina M.E. Designing a Digital Twin in Oil and Gas Technologies: Technology Integration, 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 2024, pp. 352-355. Available at: <https://doi.org/10.1109/SCM62608.2024.10554148>.
16. Asadulagi M.-A.M., Pershin I.M., & Tsapleva V.V. Research on Hydrolithospheric Processes Using the Results of Groundwater Inflow Testing, *Water*, 2024, 16, 487. Available at: <https://doi.org/10.3390/w16030487>.
17. Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic, *Energies*, 2023, 16, 3124. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16073124>.
18. Novozhilov I.M., Abramkin S.E., Maltsev P.A., Kuharova T.V., & Plotnikov A.V. Development of a Distributed Pressure Field Control System for Gas Production in a Structurally Complex Field, *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*, 2025, 18 (4), pp. 55-66 Available at: <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-4-55-66>.
19. Nikolaev A.V., & Kychkin A.V. Development and integration of an underground mining enterprise ventilation process simulations into the demand response, *Journal of Mining Institute*, 2025, 275, pp. 18-29. Retrieved from. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16568>.
20. Kazantseva V.V., Ozhigin D.S., Kosarev N.S., Satbergenova A.K., & Ozhigina S.B. Development of complex system of geotechnical monitoring of technogenic objects based on geospatial data, *Journal of Mining Institute*, 2025. Retrieved from <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16590>.
21. He Y.W., He Z.Y., Tang Y., Xu Y.J., Long J.C., & Sepehrnoori K. Shale gas production evaluation framework based on data-driven models, *Petroleum Science*, 2023, 20 (3). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.12.003>.
22. Sidorenko A., Kriukov A., Meshkov A., & Sidorenko S.A. Comprehensive Technical and Economic Analysis of Rubber-Tyred Transport Implementation in Longwall Mining: A Case Study on the V.D. Yalovsky Coal Mine, *Mining*, 2025, 5, 65. Available at: <https://doi.org/10.3390/mining5040065>.
23. Marinina O., Malikov A., Lyubek Y., Pasternak S., Reshneva E., & Stolbovskaya N. Selection of Enhanced Oil Recovery Method on the Basis of Clustering Wells, *Processes*, 2024, 12, 2082. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr12102082>.
24. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities, *Journal of Mining Institute*, 2025, 272, pp. 171-180. Retrieved from: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16516>.
25. Montenegro J., Veloz C., & Ricaurte M. Estimating water content of natural gas mixtures considering heavy hydrocarbons contribution using artificial neural networks, *Petroleum Science and Technology*, 2023, 41 (8). Available at: <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2075012>.

Мартirosян Александр Витальевич – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; e-mail: Martirosyan_AV@pers.spmi.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78123288566; к.т.н.; доцент кафедры системного анализа и управления.

Ромашин Даниил Васильевич – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; e-mail: Daniil.V-Romashin@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79620194779; аспирант кафедры системного анализа управления.

Martirosyan Alexander Vitalevich – Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II; e-mail: Martirosyan_AV@pers.spmi.ru; Saint Petersburg; Russia; phone: +78123288566; cand. of eng. sc.; associate professor of the Department of System Analysis and Management.

Romashin Daniil Vasilyevich – Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II; e-mail: Romashin@yandex.ru; e-mail: Romashin@yandex.ru; Saint Petersburg; Russia; phone: +79620194779; postgraduate student of the Department of System Analysis and Management.

УДК 519.21

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-249-259

В.Х. Пшихопов, А.Л. Веревкин, А.Р. Гайдук, Л.С. Веревкина

МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ РЕКОФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМ

Представлены разработанные матричный метод одновременной оценки надёжности нескольких вариантов сложных мультиагентных реконфигурируемых систем, а также стадийный метод резервирования агентов, отличающиеся от известных простотой и широкой областью применения. Матричный метод оценки надёжности заключается в матричном отображении параметров надёжности всех агентов конкретного вариантов группы агентов системы и векторном представлении условий выполнения миссии. Предполагается, что надёжность выполнения миссии целевой группой агентов определяется только надёжностью самих агентов и характером их резервирования. Метод стадийного резервирования отличается тем, что традиционные типовые схемы резервирования используются как стадии процесса резервирования группы агентов, что позволяет существенно повысить надёжность вариантов системы. Агенты системы делятся на активных, непосредственно выполняющих текущую миссию, и пассивных, находящихся в режиме ожидания активации. Активные агенты, в свою очередь, подразделяются на основные и резервные, причём основные агенты начинают выполнение миссии, а резервные агенты, ожидая замены отказавших активных агентов, могут быть как в состоянии горячего резерва, так и в состоянии холодного резерва. Специфические условия выполнения миссии учитываются вектором поправочных коэффициентов, что существенно повышает точность оценки надёжности и прогноза времени безотказной работы группы агентов. Матричный метод оценки надёжности позволяет определить расчётную надёжность всех возможных вариантов системы и найти целесообразный вариант, который имеет требуемые параметры надёжности для выполнения данной миссии в конкретных условиях. Метод стадийного резервирования позволяет существенно повысить надёжность вариантов системы, по сравнению с традиционными методами резервирования, что значительно расширяет область применения сложных мультиагентных реконфигурируемых систем. Важной особенностью предложенных методов оценки и прогнозирования надёжности является их аналитический характер, что позволяет использовать при решении задач обеспечения требуемой надёжности выполнения миссий сложными мультиагентными системами современные быстродействующие вычислительные средства.

Сложная мультиагентная система; реконфигурация; надёжность, матричный метод; поправочный коэффициент; стадийное резервирование.

V.Kh. Pshikhopov, A.L. Verevkin, A.R. Gaiduk, L.S. Verevkina

MATRIX METHOD FOR SIMULTANEOUS RELIABILITY ASSESSMENT OF COMPLEX MULTI-AGENT RECONFIGURABLE SYSTEMS

The article presents the developed matrix method of simultaneous assessment of the reliability of several variants of complex multi-agent reconfigurable systems, as well as the staged method of reservation, which differ from the known ones in their simplicity and wide scope of application The matrix reli-