



10.5281/zenodo.13117690

ДЖАЙЛАГАНОВ Адильжан Айдарович

магистрант, Университет Южной Калифорнии, США, г. Лос-Анжелес

ПРАКТИКИ УСТОЙЧИВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ: ОБЗОР ТЕКУЩИХ ТЕНДЕНЦИЙ И БУДУЩИХ НАПРАВЛЕНИЙ

Аннотация. Энергетический сектор должен сбалансировать растущие потребности в электроэнергии с экологической устойчивостью. Устойчивые методы обслуживания являются ключом к повышению эффективности, снижению затрат и минимизации воздействия на окружающую среду. Внедрение экологически чистых материалов, методов сокращения отходов и энергоэффективных операций, особенно посредством предиктивного обслуживания с использованием Интернета вещей и аналитики данных, может значительно снизить частоту отказов оборудования и продлить срок службы инфраструктуры, тем самым повышая эксплуатационную эффективность и экономию средств.

Ключевые слова: техническое обслуживание, энергетический сектор, устойчивое развитие, искусственный интеллект, интернет вещей и интеграция аналитики больших данных.

Энергетическая отрасль полна проблем и возможностей для удовлетворения растущих потребностей в электроэнергии, оказывая при этом минимальное воздействие на окружающую среду. Растет потребность в устойчивом обслуживании для повышения эффективности, снижения затрат и минимизации воздействия на окружающую среду. Эти меры обеспечат долговечность инфраструктуры в tandem с глобальным переходом к более экологичным и устойчивым энергетическим системам.

Такие проблемы, как истощение ресурсов, загрязнение и изменение климата, больше нельзя игнорировать, и устойчивые методы обслуживания будут играть важную роль в контроле этих проблем. Это достигается путем применения экологически чистых материалов, методов сокращения отходов и энергоэффективных операций. Из нескольких таких методов одним из самых мощных должно быть предиктивное обслуживание с использованием Интернета вещей и аналитики данных. Это может значительно снизить частоту отказов оборудования, а также увеличить срок службы жизненно важной инфраструктуры. Это не только поможет повысить эксплуатационную эффективность, но и внесет существенный вклад в экономию средств и защиту окружающей среды за счет сокращения частых замен и запросов на ремонт [1].

Абуэлануар, Б. и др. (2021) обнаружили, что эффективные методы технического обслуживания, такие как предиктивное обслуживание, могут значительно сократить выбросы углерода от объектов генерации энергии за счет обеспечения оптимальной производительности оборудования, что приводит к сокращению выбросов на 10–20 % за счет предотвращения неисправностей и оптимизации эффективности [2]. Кроме того, методы устойчивого технического обслуживания, которые используют экологически чистые материалы и инициативы по переработке, помогают минимизировать отходы и уменьшить воздействие на окружающую среду от мероприятий по техническому обслуживанию.

Цель этой статьи – изучить текущие тенденции и будущие направления в методах устойчивого технического обслуживания в энергетическом секторе. Она направлена на предоставление всестороннего обзора того, как развиваются эти методы, технологий, определяющих эти изменения, и ожидаемых разработок, которые будут определять будущее технического обслуживания в энергетической отрасли. Рассматривая эти аспекты, статья стремится подчеркнуть важность устойчивого технического обслуживания для повышения эффективности, снижения затрат и защиты окружающей среды.

Текущие тенденции и будущие направления в устойчивых методах обслуживания в энергетическом секторе

Одной из заметных тенденций в устойчивом обслуживании в энергетическом секторе является внедрение экологически чистых материалов. Это включает использование биоразлагаемых смазочных материалов и масел, которые снижают загрязнение окружающей среды, и замену опасных химических веществ экологически чистыми альтернативами, что минимизирует токсичные отходы. Кроме того, растет внедрение перерабатываемых и повторно используемых компонентов, что помогает сократить отходы и продвигать методы круговой экономики [2].

Будущие направления в этой области, вероятно, будут включать более тесную интеграцию этих методов, обусловленную достижениями в области зеленых технологий и более строгими экологическими нормами. Постоянное совершенствование и внедрение устойчивых материалов необходимы для достижения долгосрочных целей устойчивости в энергетическом секторе. Исследования показывают, что такие методы не только способствуют защите окружающей среды, но и повышают эксплуатационную эффективность и снижают затраты на обслуживание, тем самым обеспечивая как экологические, так и экономические выгоды.

Сокращение отходов является неотъемлемой частью устойчивых методов обслуживания в энергетическом секторе, включая стратегии по минимизации образования отходов, переработке и повторному использованию деталей и материалов. Эффективные стратегии включают внедрение графиков обслуживания, которые сокращают ненужные замены, и использование расширенной диагностики для предотвращения чрезмерного обслуживания. Переработка и повторное использование компонентов, таких как металлические детали и смазочные материалы, не только сокращают отходы, но и снижают эксплуатационные расходы. Например, обзор Негрете-Кардосо, М. и др. (2022 г.) подчеркивает важность стратегий круговой экономики в управлении отходами, подчеркивая преимущества повторного использования и переработки материалов с целью минимизации отходов и повышения устойчивости [3].

Энергоэффективные операции по техническому обслуживанию имеют решающее значение для снижения потребления энергии и

повышения устойчивости промышленных систем. Одной из ключевых стратегий является оптимизация графиков технического обслуживания, гарантирующая, что оборудование обслуживается только при необходимости, тем самым избегая затрат на энергию, связанных с чрезмерным обслуживанием или неожиданными сбоями. Прогностическое обслуживание, которое использует данные и аналитику для прогнозирования того, когда следует проводить мероприятия по техническому обслуживанию, продемонстрировало значительный потенциал в снижении потребления энергии в промышленных средах [4]. Этот подход оптимизирует графики технического обслуживания, тем самым повышая эксплуатационную эффективность и устойчивость таких систем, как насосные системы и тепловые электростанции.

Кроме того, интеграция систем управления энергопотреблением (integrating energy management systems (EMS)) в практику технического обслуживания позволяет осуществлять непрерывный мониторинг и оптимизацию использования энергии. EMS позволяет получать данные о потреблении энергии в режиме реального времени, что позволяет бригадам по техническому обслуживанию принимать обоснованные решения, повышающие энергоэффективность. Мишос, С. и др. (2023) обсуждают, как интеллектуальные системы управления энергопотреблением (intelligent energy management systems (IEMS)) повышают энергоэффективность и эксплуатационные процессы с помощью расширенной аналитики и мониторинга в режиме реального времени, что приводит к значительной экономии энергии в различных средах [5].

Прогностическое и профилактическое обслуживание играют важную роль в оптимизации производительности и долговечности оборудования. Внедрение прогностического обслуживания с использованием Интернета вещей (IoT) и аналитики данных позволяет в режиме реального времени отслеживать и прогнозировать отказы оборудования, что позволяет своевременно вмешиваться [4]. С другой стороны, профилактическое обслуживание включает в себя регулярные плановые задачи по обслуживанию, направленные на продление срока службы оборудования и сокращение непредвиденных поломок. Такой подход гарантирует эффективную работу машин и оборудования, сводя к минимуму вероятность

внезапных отказов и дорогостоящего ремонта. Эффективные стратегии профилактического обслуживания играют важную роль в поддержании оптимальной производительности оборудования, поскольку позволяют анализировать неполадки до того, как они перерастут в серьезные.

Цифровая трансформация и интеллектуальные технологии революционизируют ландшафт обслуживания в энергетическом секторе. Одной из таких важных разработок являются цифровые близнецы, которые предназначены для копирования физических активов. Цифровые близнецы предлагают возможности мониторинга и моделирования в реальном времени. Возможности искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения улучшают прогнозируемое обслуживание, еще больше убеждают нас в будущем обслуживании в энергетическом секторе. Эти технологии повышают надежность активов и значительно сокращают расходы на обслуживание за счет использования огромных массивов данных для прогнозирования проблем до того, как они произойдут. Не говоря уже о влиянии автоматизации и робототехники, которые автоматизируют задачи обслуживания, повышают эксплуатационную эффективность и вносят дополнительный вклад в обеспечение устойчивости за счет минимизации человеческих ошибок и снижения воздействия на окружающую среду [6]. В совокупности эти интеллектуальные технологии устанавливают новые стандарты качества обслуживания в энергетическом секторе, обеспечивая как экономические, так и экологические преимущества.

Обучение обслуживающего персонала устойчивым методам повышает эффективность работы и минимизирует воздействие на окружающую среду. Программы зеленого обучения улучшают использование ресурсов, сокращают отходы и укрепляют устойчивое бизнес-преимущество компании. Дополненная реальность (AR) и виртуальная реальность (VR) предлагают иммерсивное практическое обучение, улучшая сохранение навыков и сокращая затраты. Непрерывное образование и методы зеленого управления человеческими ресурсами (HRM) способствуют формированию культуры устойчивого развития, поощряя проактивную экологическую ответственность [7]. Эти стратегии жизненно важны для достижения целей устойчивого развития в энергетическом

секторе, повышения эффективности и управления.

Нормативные и нормативно-правовые аспекты имеют важное значение в практике технического обслуживания в энергетическом секторе. Правила устойчивого технического обслуживания, установленные национальными и международными органами, направлены на сокращение выбросов углерода и продвижение экологически чистых методов использования энергии [8]. Соблюдение этих стандартов требует внедрения экологически чистых методов и технологий, поддержки целей устойчивого развития и минимизации воздействия на окружающую среду. Передовые практики, такие как внедрение цифровых двойников и предиктивного обслуживания, иллюстрируют, как компании могут соблюдать правила, одновременно повышая производительность и устойчивость. Цифровые двойники, которые являются виртуальными копиями физических активов, обеспечивают мониторинг и моделирование в реальном времени, помогая компаниям прогнозировать и предотвращать отказы оборудования [9]. Эти структуры стимулируют как соблюдение законодательства, так и инновации, улучшая операционное совершенство в энергетическом секторе.

Внедрение устойчивых методов обслуживания в энергетическом секторе сопряжено с несколькими общими **проблемами**. К ним относятся технические барьеры, такие как сложность интеграции передовых технологий, таких как системы предиктивного обслуживания, и необходимость квалифицированного персонала для их эффективной эксплуатации [10]. Финансовые барьеры также создают значительные препятствия, поскольку первоначальные инвестиции, необходимые для устойчивых технологий и связанного с ними обучения, могут быть существенными. Кроме того, организационные барьеры, такие как сопротивление изменениям и необходимость эффективного межведомственного сотрудничества, еще больше усложняют принятие этих методов [11].

Стратегии преодоления этих проблем включают обеспечение адекватного финансирования и финансовых стимулов для поддержки первоначальных инвестиций в устойчивые технологии [10]. Предоставление программ постоянного обучения гарантирует, что обслуживающий персонал будет оснащен необходимыми навыками для управления и интерпретации сложных данных [12]. Кроме того,

формирование культуры устойчивости в организациях посредством приверженности руководства и поощрения кросс-функционального сотрудничества может помочь смягчить сопротивление изменениям и обеспечить успешное внедрение устойчивых методов обслуживания. Использование поддерживающей государственной политики и нормативных актов также может создать благоприятную среду для принятия этих методов [13, 14].

Решая эти проблемы посредством стратегического планирования и использования имеющихся ресурсов, энергетический сектор может повысить свою устойчивость и эффективность работы, способствуя достижению более широких экологических и экономических целей.

Будущие направления и инновации в обслуживании энергетического сектора, как ожидается, будут в значительной степени зависеть от новых технологий, меняющейся политики и продолжающейся эволюции устойчивых практик. Ожидается, что передовые технологии, такие как ИИ, Интернет вещей и аналитика больших данных, произведут революцию в устойчивом обслуживании, обеспечив возможность предиктивного обслуживания, оптимизации энергопотребления и повышения общей эффективности энергетических систем [15]. Кроме того, новые материалы и интеллектуальные датчики, вероятно, будут играть решающую роль в продлении срока службы оборудования и сокращении времени простоя. Что касается политики, будущие тенденции указывают на более сильный акцент на нормативных рамках, которые поддерживают устойчивые инвестиции и внедрение зеленых технологий. Пакет устойчивого финансирования ЕС 2023 является примером того, как финансовые стимулы и поддерживающие правила могут стимулировать переход к более устойчивым энергетическим практикам [16]. По мере сближения этих технологий и политик ожидается, что эволюция устойчивых методов обслуживания будет сосредоточена на принципах круговой экономики, поощряя повторное использование, переработку и повторное использование материалов для минимизации отходов и воздействия на окружающую среду. Эти достижения в совокупности предполагают преобразующий сдвиг в сторону более устойчивых, эффективных и устойчивых стратегий обслуживания в энергетическом секторе.

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что устойчивые методы обслуживания в энергетическом

секторе имеют важное значение для решения двойной задачи удовлетворения растущего спроса на энергию и минимизации воздействия на окружающую среду. Текущие тенденции подчеркивают важность экологически чистых материалов, сокращения отходов и энергоэффективных операций, обусловленных достижениями в области предиктивного обслуживания и интеллектуальных технологий. Будущие направления, вероятно, будут сосредоточены на интеграции искусственного интеллекта (AI), Интернета вещей (IoT) и аналитики больших данных, поддерживаемых развивающимися нормативными базами и принципами круговой экономики. Приняв эти устойчивые методы, энергетический сектор может повысить эффективность, сократить расходы и внести значительный вклад в глобальные цели устойчивого развития. Продолжающееся развитие этих методов обещает более устойчивое и экологически чистое энергетическое будущее.

Литература

1. Wu W. (2021). Sustainable Infrastructure Design and Maintenance. In: Rotaru A. (eds) Critical Thinking in the Sustainable Rehabilitation and Risk Management of the Built Environment. CRITRE-BUILT 2019. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61118-7_8.
2. Abouelanouar B., Elkihel A., Khathyri F., Gziri H. (2021). Monitoring Energy Consumption Based on Predictive Maintenance Techniques. In: Hajji B., Mellit A., Marco Tina G., Rabhi A., Launay J., Naimi S. (eds) Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy Systems. ICEERE 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 681. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6259-4_6.
3. Negrete-Cardoso M., Rosano-Ortega G., Álvarez-Aros E.L. et al. Circular economy strategy and waste management: a bibliometric analysis in its contribution to sustainable development, toward a post-COVID-19 era. *Environ Sci Pollut Res* 29, 61729–61746 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18703-3>.
4. Olesen JF, Shaker HR. Predictive maintenance for pump systems and thermal power plants: State-of-the-art review, trends and challenges. *Sensors* (Basel, Switzerland). 2020; 20 (8): 2425 –. <https://doi:10.3390/s20082425>.
5. Mischos S., Dalagdi E., Vrakas D. Intelligent energy management systems: a review. *Artif*

Intell Rev 56, 11635–11674 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10441-3>.

6. Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E. Digital Twins in Product Lifecycle for Sustainability in Manufacturing and Maintenance. Appl. Sci. 2021, 11, 31. <https://doi.org/10.3390/app11010031>.

7. Khan N.U., Wei H., Yue G., Nazir N., Zainol N.R. Exploring Themes of Sustainable Practices in Manufacturing Industry: Using Thematic Networks Approach. Sustainability 2021, 13, 10288. <https://doi.org/10.3390/su131810288>.

8. Nwaiwu F. Digitalisation and sustainable energy transitions in Africa: assessing the impact of policy and regulatory environments on the energy sector in Nigeria and South Africa. Energy Sustain Soc 11, 48 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00325-1>.

9. Abd Wahab NH, Hasikin K, Wee Lai K, Xia K, Bei L, Huang K, Wu X. 2024. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices. PeerJ Computer Science 10:e1943. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1943>.

10. Yongjun Lv, Transitioning to sustainable energy: opportunities, challenges, and the potential of blockchain technology, Front. Energy Res., Sec. Sustainable Energy Systems, Volume 11 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1258044>.

11. Tjebane M.M., Musonda I., Onososen A., Ramabodu M. (2023). Challenges for the Implementation of Sustainable Construction Practices in Developing Countries: A Bibliometric Review.

In: Skatulla, S., Beushausen, H. (eds) Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering. ICCCB 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 358. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32515-1_9.

12. Jasiulewicz-Kaczmarek M. (2013). Sustainability: Orientation in Maintenance Management—Theoretical Background. In: Golinska P. (eds) EcoProduction and Logistics. EcoProduction. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23553-5_8.

13. Kandpal V., Jaswal A., Santibanez Gonzalez E.D.R., Agarwal N. (2024). Sustainable Energy Transition, Circular Economy, and ESG Practices. In: Sustainable Energy Transition. Circular Economy and Sustainability. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52943-6_1.

14. Ali F., Dawood A., Hussain A. et al. Fueling the future: biomass applications for green and sustainable energy. Discov Sustain 5, 156 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00309-z>.

15. Simon Elias Bibri, Alahi Alexandre, Ayyoob Sharifi and John Krogstie, Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: an integrated approach to an extensive literature review, Energy Informatics (2023) 6:9, <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00259-2>.

16. European Commission. (2023). Sustainable Finance Package 2023 https://finance.ec.europa.eu/publications/sustainable-finance-package-2023_en.

JAILAGANOV Adilzhan Aidarovich

graduate student, University of Southern California, USA, Los Angeles

SUSTAINABLE MAINTENANCE PRACTICES IN THE ENERGY SECTOR: AN OVERVIEW OF CURRENT TRENDS AND FUTURE DIRECTIONS

Abstract. *The energy sector must balance the growing demand for electricity with environmental sustainability. Sustainable maintenance practices are the key to improving efficiency, reducing costs and minimizing environmental impacts. The introduction of environmentally friendly materials, waste reduction methods and energy-efficient operations, especially through predictive maintenance using the Internet of Things and data analytics, can significantly reduce the failure rate of equipment and extend the service life of infrastructure, thereby increasing operational efficiency and cost savings.*

Keywords: *maintenance, energy sector, sustainable development, artificial intelligence, Internet of Things and integration of big data analytics.*