

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44>

УДК 621.165

## Разработка алгоритма реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования

**Байдакова Н. В.\***, **Афонин А. В.**, **Благочиннов А. В.**

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском  
пр. Ленина, 69, 404111, г. Волжский Волгоградской обл., Россия

Поступила / Received 15.01.2021

Принята к печати / Accepted for publication 02.03.2021

Изношенность и старение технического парка объектов теплоэнергетики приводят к непредсказуемому останову энергетического оборудования. Поэтому требуется создание особого подхода в программах по обслуживанию и ремонту с учетом возможности предсказания момента появления дефекта, его развития, а также срока возможного отказа оборудования. Применяемая на предприятиях система планово-предупредительного ремонта оборудования основана на сборе ретроспективных данных о возникающих дефектах и отказах на оборудовании ТЭС и обобщающей статистике по аналогичным образцам оборудования. Приведен анализ отечественных и зарубежных методик технического обслуживания и организации ремонта, а также возможности их применения в современной энергетике. Для создания эффективной системы управления производственными активами, при которой решается задача поиска баланса между потенциальным риском потерь, связанным с эксплуатацией оборудования, и затратами на устранение возникающих дефектов, используются системы нового класса на рынке программного обеспечения, осуществляющие прогнозное обслуживание. Для оптимизации системы технического обслуживания оборудования и обеспечения бесперебойной и надежной работы при минимальных затратах на эксплуатацию, а также для сокращения простоя оборудования, внеплановые и аварийные работы целесообразно использовать современный подход управления надежностью, рисками и стоимостью владения активами, позволяющий контролировать экономическую эффективность. Показана необходимость создания алгоритма реализации ремонтных программ энергетического оборудования по техническому состоянию для использования его в цифровых энергетических системах. Предложен алгоритм реализации ремонтной программы энергоблоков электрических станций, включая паровые котлы и турбины ТЭС, отличающийся учетом технического состояния энергетического оборудования, позволяющий распознать появившийся дефект, определить причину его возникновения, его эволюцию и срок возможного отказа оборудования. В разрабатываемом алгоритме ремонтного обслуживания предлагается осуществить переход от статистических эмпирических оценок технического состояния оборудования к объективным оценкам, получаемым на базе автоматизированных систем технического диагностирования и прогнозного анализа ситуаций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** надежность, диагностика, ресурс, ремонт, оборудование, техническое состояние

### Благодарности

Результаты работы, представленные в статье, получены в ходе выполнения НИР в рамках Госзаказа РФ FSWF-2020-0025 "Разработка методов и анализ способов достижения высокого уровня безопасности и конкурентоспособности объектов энергетических систем на базе цифровых технологий".

### Адрес для переписки:

Байдакова Н. В.  
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», кафедра Энергетики  
пр. Ленина, 69, 414111, г. Волжский Волгоградской обл.,  
Россия  
e-mail: baydakovanv@mail.ru

### Address for correspondence:

Baidakova N. V.  
Branch of "NIU" MPEI, department of Energy  
pr. Lenin, 69, 414111, Volzhsky Volgograd region, Russia,  
e-mail: baydakovanv@mail.ru

### Для цитирования:

Байдакова Н. В., Афонин А. В., Благочиннов А. В. Разработка алгоритма реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования. *Надежность и безопасность энергетики*. 2021 – Т. 14, №1. – С. 40–44.  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44>

### For citation:

Baidakova N. V., Afonin A. V., Blagochinnov A. V. Development of an algorithm of implementation of programs of repair of steam boilers and turbines of TPPs based on technical condition of power equipment]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2021. vol. 14, no. 1, pp. 40–44 (in Russian).  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44>

# Development of an algorithm of implementation of programs of repair of steam boilers and turbines of TPPs based on technical condition of power equipment

**Baidakova N. V.\*, Afonin A. V., Blagochinnov A. V.**

Branch of "NIU" MPEI"

pr. Lenin, 69, 414111, Volzhsky Volgograd region, Russia

Deterioration and aging of the technical fleet of thermal power facilities lead to an unpredictable shutdowns of power equipment. Therefore, it is necessary to create a special approach in maintenance and repair programs, taking into account the possibility of predicting the moment of onset of the defect, its development, as well as the time of possible equipment failure. The equipment maintenance system used at the enterprises is based on the collection of retrospective data on defects and failures on the main and auxiliary equipment of the TPP and summarizing statistics on identical or similar equipment samples. Analysis of domestic and foreign methods of maintenance and organization of repair, as well as possibility of their application in modern power engineering is given. In order to create an efficient production asset management system, which addresses the problem of finding a balance between the potential risk of losses associated with both the operation of equipment and the cost of correcting defects, new class systems are now used in the software market, which carry out equipment maintenance based on the forecast. In order to optimize the equipment maintenance system and ensure uninterrupted and reliable operation of the equipment at minimum operating costs, as well as to reduce equipment downtime, unscheduled and emergency operations, it is advisable to use a modern approach to manage both reliability and risk, as well as the cost of asset ownership. This will enable to control the economic efficiency of the use of production assets. The necessity of creation of an algorithm of implementation of repair programs of power equipment base on technical condition for its use in digital power systems is shown. An algorithm is proposed for implementing the repair program of power units of electric power plants, including steam boilers and turbines of thermal power plants, differing by taking into account the technical condition of power equipment, which allows recognizing the defect that has appeared, determining the cause of its occurrence, its evolution and the duration of possible equipment failure. In the developed repair maintenance algorithm, it is proposed to make a transition from statistical empirical assessments of the technical condition of the equipment to objective estimates obtained on the basis of automated technical diagnostics systems and predictive analysis of situations.

KEYWORDS: reliability, diagnostics, service life, repair, equipment, technical condition

## Acknowledgments

The results of the work presented in the article were obtained during the implementation of research in the framework of the State Order RF FSWF-2020-0025 "Development of methods and analysis of ways to achieve a high level of safety and competitiveness of facilities of energy systems based on digital technologies"

Наибольшая доля выработки электрической энергии приходится на тепловые электростанции и, безусловно, улучшение экономических показателей, технических характеристик энергетического оборудования является приоритетной задачей для осуществления надежного обеспечения электроэнергией потребителя. Стоимость электроэнергии напрямую влияет на конечную стоимость продукции и может составлять от 10 до 30% в зависимости от технологических процессов [1].

Изношенность, моральное и физическое старение технического парка объектов тепловой энергетики приводят к останову энергетического оборудования. Поэтому требуется создание особого подхода в программах по обслуживанию и ремонту. Уже в 2000 г. в теплоэнергетической базе России наблюдались повышенные затраты на осуществление ремонтной деятельности из-за того, что амортизационный срок был исчерпан на 40% мощности оборудования, установленного на ТЭС. 10,97% от установленной мощности — такой показатель достижения сорокалетнего срока

службы энергоустановок был в 2000 г., а в 2020 г. эта величина возросла до 71%, т. е. увеличилась в 7 раз [2].

Существующая на сегодняшний день система планово-предупредительного ремонта (ППР) оборудования сложилась по принципу сбора ретроспективных данных о возникающих дефектах и отказах на основном и вспомогательном оборудовании ТЭС, а также из обобщающей статистики по идентичным или аналогичным образцам оборудования. На основании этих статистических данных определяется усредненный срок (ресурс) работы системы или агрегата, а также время проведения планово-предупредительного ремонта.

Анализ Межгосударственных стандартов ГОСТ 18322-2016 "Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения" и ГОСТ 27.002-2015 "Надежность в технике. Термины и определения" выявил следующие особенности:

1. Некоторые элементы оборудования имеют достаточный запас надежности, но согласно техническим нормативам подлежат замене или восстановлению.

2. Стоимость заменяемых, но еще годных к эксплуатации элементов и работ, связанных с их заменой, в отдельных случаях достигают 35% от общей стоимости ремонта.

3. Существующие методики сбора и хранения характеристик работы оборудования не могут предсказать момент появления дефекта, его развитие и срок возможного отказа оборудования.

Развитие теории надежности, совершенствование методов диагностики и цифровых технологий определяет принципиально новый подход к планированию и проведению обслуживания оборудования с использованием цифровых технологий.

Эволюция развития системы технического обслуживания энергетического оборудования в нашей стране представлена в таблице 1.

В целях оптимизации системы технического обслуживания оборудования и обеспечения бесперебойной и надежной работы оборудования при минимальных затратах на эксплуатацию, а также для сокращения простоя оборудования, внеплановые и аварийные работы целесообразно использовать современный подход IV поколения, позволяющий контролировать экономическую эффективность использования производственных активов, что подтверждается исследованиями [3, 4].

Решением подобных проблем занимаются и в развитых странах Запада, в которых разработано несколько различных методик. Целью системы надежности-ориентированного обслуживания (Reliability Centred Maintenance) является соблюдение требований надежности и безопасности системы при обеспечении максимально возможного уровня эффективности за счет формирования оптимальной программы технического обслуживания и ремонтов оборудования. Для системы анализа дефектов, последствий и критичности (Failure Modes, Effects & Criticality Analysis) основой явля-

ется поддержка принятия решений, направленных на снижение вероятности отказов и их последствий. Данный метод можно применять неоднократно в течение срока службы объекта или процесса. Третья методика оценки состояния актива (Asset Condition Assessment) определяет экономическую целесообразность использования определенного оборудования. Для создания системы управления производственными активами, при которой решается задача поиска баланса между потенциальным риском потерь, связанным с эксплуатацией оборудования, и затратами на его устранение сегодня используются системы нового класса на рынке программного обеспечения, осуществляющие прогнозируемое обслуживание (Predictive Maintenance). Данные системы являются развитием и расширением возможностей классических систем управления активами (FMCA, PDM и ТОиР IV поколения). Они предназначены для обеспечения надежности оборудования исходя из фактического и прогнозируемого состояния оборудования, а также условий его эксплуатации.

Применяя системы интеллектуальной аналитики (IA) и управляя информацией, энергетические компании могут анализировать собираемые данные о текущем состоянии всех элементов оборудования и прогнозировать техническое состояние системы в целом. Это облегчит доступ к данным об изделии на протяжении всего его жизненного цикла и позволит объединить все данные о функционировании оборудования в единую логическую систему. В результате применения подобного алгоритма все, кто принимает участие в эксплуатации и обслуживании оборудования, получают доступ к управлению процессами обнаружения возможного дефекта, его оценке и выбору методики его устранения. Одним из решений для IA и предиктивного анализа является Clover PMM (Predictive Maintenance & Monitoring) — разработка российской компании Clover Group [5]. Основная задача, которую решает Clover PMM в энергетике

**Таблица 1.** Развитие отечественных подходов и систем технического обслуживания оборудования  
**Table 1.** Development of domestic approaches and equipment maintenance systems

|                           | I поколение<br>«Эксплуатация до отказа»<br>I generation «Operation to failure»  | II поколение «Фиксированный межремонтный интервал»<br>II generation «Fixed overhaul interval»   | III поколение «Планирование ремонтов по состоянию и надежности»<br>III generation «Planning repairs by condition and reliability»                                      | IV поколение «Управление надежностью, рисками и стоимостью владения активами»<br>IV generation «Managing Reliability, Risk, and Cost of Ownership»                          |
|---------------------------|---|---|--|---|
| Достоинства<br>Advantages | - Минимальные затраты на обслуживание.<br>- Minimum maintenance costs.  | - Снижение времени простоя при ремонте.<br>- Снижение затрат на обслуживание.<br>- Reduced repair downtime.<br>- Lower maintenance costs. | - Относительно высокая надежность.<br>- Снижение времени простоя при ремонте.<br>- Relatively high reliability.<br>- Reduced repair downtime.                          | - Высокая надежность.<br>- Низкие затраты на обучение технического персонала.<br>- High reliability.<br>- Low training costs for technical personnel.                       |
| Недостатки<br>Cons        | - Необходимость непрерывного мониторинга состояния активов.<br>- Сложные методы управления.<br>- Need for continuous monitoring of assets.<br>- Complex management methods. | - Необходимость непрерывного мониторинга состояния активов.<br>- Need for continuous monitoring of assets.                                | - Пере-обслуживание или недо-обслуживание активов.<br>- Высокие затраты на обслуживание.<br>- Excessive or missing maintenance of assets.<br>- High maintenance costs. | - Необходимость непрерывного мониторинга состояния активов.<br>- Сложные методы управления.<br>- Need for continuous monitoring of assets.<br>- Complex management methods. |

— правильное формирование программы ремонтов относительно текущего и прогнозного технического состояния оборудования. Однако данная разработка не всегда позволяет выявить причину зарождения дефекта, что в дальнейшем не гарантирует рецидива.

В разрабатываемом алгоритме ремонтного обслуживания предложено осуществить переход от статистических эмпирических оценок технического состояния оборудования, которое используется в настоящее время к объективным на базе автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД).

АСТД и другие системы технического диагностирования должны быть ориентированы на прогнозирование:

- потенциально необоснованных выводов в капитальные и средние ремонты энергоблоков и энергоустановок;
- номенклатуры и объемов работ в составе всех видов ремонта;
- внезапных остановов энергоблоков и энергоустановок, связанных с потерей работоспособности.

На рисунке представлен разработанный алгоритм реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования.

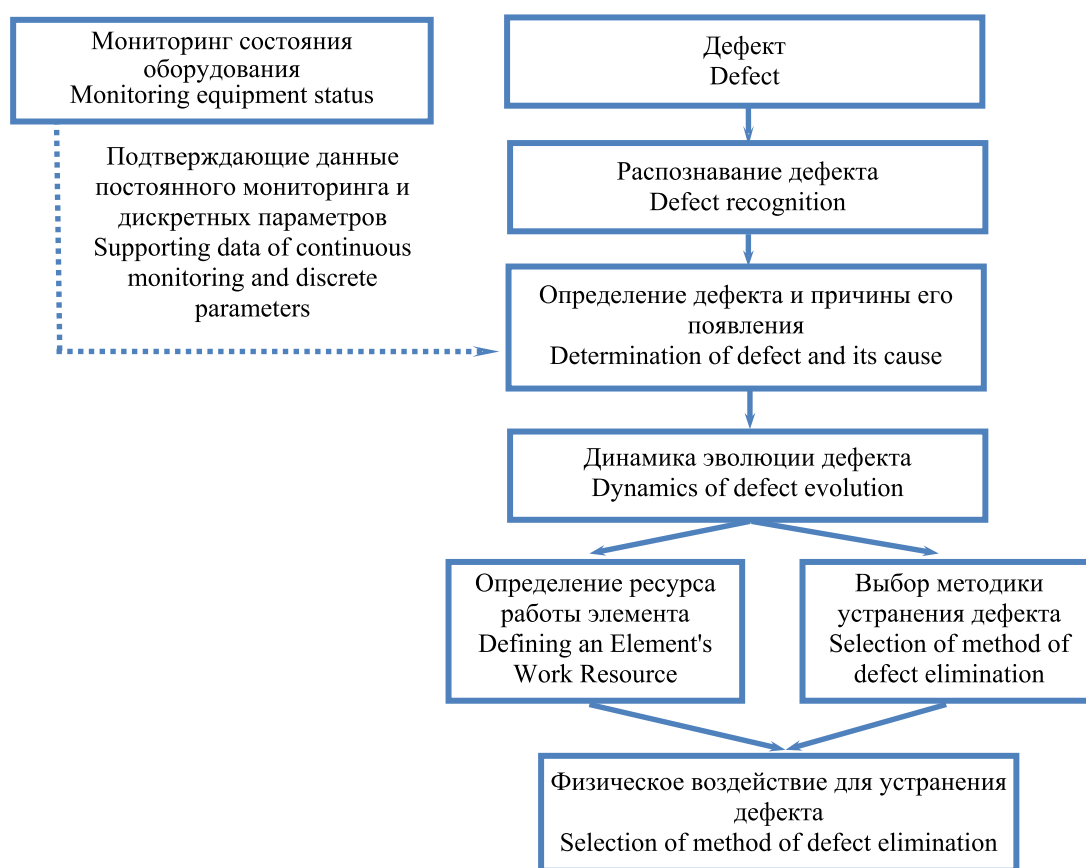
Основной задачей при реализации ремонтной программы в соответствии с системой предиктивного анализа PDM является наиболее раннее распознавание

дефекта и причины его появления. Оптимальным является распознавание дефекта по косвенным параметрическим характеристикам используя методы функциональной диагностики. Для верификации результата используются другие параметры, способные прямо или косвенно подтвердить сделанные выводы [6].

Используя данные постоянного мониторинга элементов энергетического оборудования, а также применяя подтверждающие данные по состоянию мониторинга и дискретных параметров с максимальной вероятностью, необходимо определить временные пределы эволюции дефекта вплоть до критического момента возникновения отказа.

На основании подтверждающих данных осуществляется определение вида дефекта и причин его появления. Сопоставляя данные, полученные после анализа ситуации, с данными состояния других элементов оборудования или системы в целом, определяется динамика эволюции дефекта, срок проведения работ, их необходимый объем, а также выбирается методика устранения дефекта. И лишь затем осуществляется необходимое физическое воздействие для устранения дефекта.

Аналогичные подходы формирования ремонтных программ применяются для высоковольтного оборудования на электрических подстанциях. В [7] предложен алгоритм формирования стратегии ремонта в



**Рисунок.** Алгоритм реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования

**Figure.** Algorithm for implementation of repair program of steam boilers and turbines of TPP by technical condition of power equipment

соответствии с ее техническим состоянием с учетом ее значимости для энергосистемы. Верификация приведенного алгоритма осуществлялась в рамках анализа ремонтных работ подстанций 110 кВ.

Использование распределенных реестров для фиксации сведений позволит верифицировать информацию о жизненном цикле оборудования, включая информацию о производимых ранее воздействиях. При сохранении гибкости и скорости электронного формата хранения и обработки важных данных это позволит добиться высокой достоверности результата [8].

Применение теории надежности и развитие систем диагностики неуклонно ведет к совершенствованию методов обслуживания и ремонта оборудования. Оптимизация комплекса необходимых воздействий позволит добиться значительного снижения расходов на обслуживание и ремонт, что, в свою очередь, позволит более рационально и экономично подойти к вопросу повышения надежности оборудования энергетических предприятий.

## Выводы

Приведен анализ существующих методик технического обслуживания и ремонтов энергетического оборудования. Предложен алгоритм реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования для использования его в цифровых энергетических системах. Изношенность и старение технического парка объектов тепловой энергетики приводят к останову энергетического оборудования. Поэтому требуется создание особого подхода в программах по обслуживанию и ремонту с учетом возможности предсказания момента появления дефекта, его развития, а также срока возможного отказа оборудования.

## Список использованных источников

1. Султанов М. М., Байдакова Н. В., Афонин А. В. Анализ оценки технического состояния оборудования генерирующих систем. В сборнике: Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы II Международной научно-практической конференции 2020: 16–17.
2. Косинов Ю. П., Романов А. А., Трофимов Ю. В. (ОАО "ЦКБ Энергоремонт", ОАО «РАО ЕЭСРоссии»). Совершенствование ремонта энергетического оборудования для обеспечения надежной его эксплуатации за пределами паркового ресурса и сроков службы. <http://www.combienergy.ru/stat/691-Sovershenstvovanie-remonta-energeticheskogo-oborudovaniya>
3. Grabchak E. P. Assessment of technical condition of power equipment in digital economy. Safety and reliability of the electric power industry. 2017; 10(4): 268–274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274>
4. Kuryanov V. N., Sultanov M. M., Kuryanova E. V. and Skopova E. M. Mathematical model of the processes of restoration of power equipment in power systems by criterion of the index of technical condition. Journal of Physics: Conference Series 1683 (2020) 042041.
5. Интеллектуальная диагностика и предиктивный анализ – ос-

нова цифровой энергетики <https://integral-russia.ru/2017/10/06/intellektualnaya-diagnostika-i-prediktivnyj-analiz-osnova-tsifrovoy-energetiki>

6. Sultanov M. M., Tyagunov M. G. and Baydakova N. V. Procedure for assessment of technical condition of equipment of generating systems taking into account control effects on the basis of data management complex of monitoring and diagnostics system. Journal of Physics: Conference Series To cite this article: M. M. Sultanov et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1683 042035.

7. Khalyasmaa A. Electrical equipment condition based maintenance strategy. Conference: 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2016. DOI: 10.1109/ICEPE. 2016. 7781439.

8. Султанов М. М., Аракелян Э. К., Шестопалова Т. А., Смирнов А. А., Горбань Ю. А. Усовершенствование информационного обеспечения надежности и безопасности энергетического оборудования современных генерирующих систем на основе цифровой технологии "Блокчейн". Новое в российской электроэнергетике 2019; (1): 6–13.

## References

1. Sultanov M. M., Baidakova N. V., Afonin A. V. Analysis of the technical condition of the equipment of generating systems. In the collection: Alternative and intelligent energy. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference 2020: 16–17. (In Russ.)
2. Kosinov Yu. P., Romanov A. A., Trofimov Yu. V. (OJSC TsKB Energoremont, OJSC RAO EESRossiya). Improvement of repair of power equipment to ensure its reliable operation outside the park resource and service life. <http://www.combienergy.ru/stat/691-Sovershenstvovanie-remonta-energeticheskogo-oborudovaniya> (In Russ.)
3. Grabchak E. P. Assessment of technical condition of power equipment in digital economy. Safety and reliability of the electric power industry. 2017; 10(4): 268–274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274> (In Russ.)
4. Kuryanov V. N., Sultanov M. M., Kuryanova E. V. and Skopova E. M. Mathematical model of the processes of restoration of power equipment in power systems by criterion of the index of technical condition. Journal of Physics: Conference Series 1683 (2020) 042041. (In Eng.)
5. Intelligent diagnostics and predictive analysis – the basis of digital energy <https://integral-russia.ru/2017/10/06/intellektualnaya-diagnostika-i-prediktivnyj-analiz-osnova-tsifrovoy-energetiki> (In Russ.)
6. Sultanov M. M., Tyagunov M. G. and Baydakova N. V. Procedure for assessment of technical condition of equipment of generating systems taking into account control effects on the basis of data management complex of monitoring and diagnostics system. Journal of Physics: Conference Series To cite this article: M. M. Sultanov et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1683 042035. (In Eng.)
7. Khalyasmaa A. Electrical equipment condition based maintenance strategy // Conference: 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2016. DOI: 10.1109/ICEPE. 2016. 7781439. (In Eng.)
8. Sultanov M. M., Arakelyan E. K., Shestopalova T. A., Smirnov A. A., Gorban Yu. A. Improvement of information support of reliability and safety of power equipment of modern generating systems based on the digital technology "Blockchain". New in the Russian electric power industry 2019; (1): 6–13. (In Russ.)