

Раздел 4. «Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины»

FTAMP 50.47.02
ЭОЖ 669.01/09

DOI: [10.53002/082](https://doi.org/10.53002/082)

Д.А. Валеев, А.А. Ильин, З.С. Гельманова, И.А. Малига

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan
(E-mail: y.valeev@ttu.edu.kz)

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТОВ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ НА АО «QARMET»

В статье проведён комплексный анализ действующей системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) энергооборудования АО «Qarmet» с позиции как теоретических основ надёжности, так и практического производственного опыта. Показано, что традиционная календарная модель ППР, ориентированная на фиксированные межремонтные интервалы, в современных условиях приводит к ряду системных проблем: избыточным остановам оборудования, несогласованности ремонтных «окон» с графиками металлургического производства, росту затрат на эксплуатацию и обслуживающий персонал, а также сохранению высокой вероятности внезапных отказов, особенно для критически важного оборудования (котельного, турбинного, компрессорного и электротехнического).

Обоснована необходимость трансформации системы ППР в сторону риск-ориентированного обслуживания и обслуживания, ориентированного на надёжность. В работе предложена интегрированная модель оптимизации, включающая классификацию оборудования по критичности, применение статистического анализа отказов (в частности, распределения Вейбулла), а также внедрение элементов предиктивного технического обслуживания, основанного на вибродиагностике, термографии, анализе масла и электрических испытаниях.

Отдельное внимание уделено вопросам интеграции результатов диагностики в корпоративные системы управления производственными активами (CMMS/ERP), что позволяет перейти от разрозненных контрольных мероприятий к единому контуру управления жизненным циклом оборудования.

Результаты апробации предложенного подхода на пилотных объектах (насосные станции, компрессорные установки, трансформаторное хозяйство) демонстрируют значимый технико-экономический эффект: сокращение аварийных простоев на 15–25 %, снижение потребности в складских запасах запасных частей и узлов на 10–15 %, рост коэффициента готовности энергооборудования на 2–3 процентных пункта. Дополнительным результатом является улучшение культуры технического обслуживания, повышение квалификации ремонтного персонала и снижение стрессовой нагрузки на ремонтные службы за счёт большей предсказуемости отказов.

Ключевые слова: планово-предупредительный ремонт, энергооборудование, надёжность, оптимизация, риск-ориентированное обслуживание, предиктивное обслуживание (PdM), статистический анализ отказов

Содержание

Энергооборудование металлургических предприятий традиционно является одним из наиболее критических элементов производственной инфраструктуры, определяющим устойчивость

Раздел 4. «Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины»

технологического процесса, его экономическую эффективность и промышленную безопасность. В условиях АО «Qarmet» энергетический комплекс включает в себя котельно-турбинные агрегаты, компрессорные и насосные станции, трансформаторные парки, распределительные устройства, а также газовое и контрольно-измерительное оборудование. От исправности данных систем зависит стабильность работы доменного, сталеплавильного и прокатного производств, что обуславливает их стратегическую значимость для всего комбината.

Исторически на металлургических предприятиях Казахстана и постсоветского пространства применялась система планово-предупредительных ремонтов (ППР), основанная на жёстко регламентированных межремонтных интервалах и отраслевых нормативных документах. Такая модель, сформированная в середине XX века, позволила стандартизировать обслуживание и снизить аварийность в условиях ограниченной доступности диагностических технологий. Однако развитие промышленности XXI века, рост требований к энергоэффективности, ужесточение экологических и нормативных стандартов, а также появление новых средств технической диагностики выявили ключевые ограничения традиционного подхода.

Современная практика эксплуатации энергооборудования на АО «Qarmet» показывает, что календарно-жёсткая система ППР приводит к ряду негативных последствий: преждевременным остановам исправных агрегатов, вызывающим неоправданные экономические затраты; недостаточному учёту фактической наработки и индивидуальных режимов эксплуатации оборудования; повышенному риску скрытых отказов между плановыми ремонтами; несогласованности графиков ППР с производственными циклами основных цехов.

Международный опыт (ISO 17359:2018; ISO 31000:2018) и результаты исследований (Moubray, 1997; Jardine, 2013; Гайдамака, 2019) свидетельствуют о необходимости трансформации систем обслуживания в направлении риск-ориентированного и предиктивного подхода. Ключевая идея заключается в том, чтобы переходить от «ремонта по календарю» к ремонту по состоянию и по риску, когда решения о проведении обслуживания принимаются с учётом вероятности отказа, его последствий и фактических диагностических данных [1-6]. Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью комплексной оптимизации системы ППР на АО «Qarmet» с использованием методов анализа надёжности, предиктивной диагностики и цифровых инструментов управления производственными активами. Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной модели ППР, адаптированной к специфике металлургического энергохозяйства, а практическая значимость — в повышении надёжности и эффективности эксплуатации критически важного оборудования, снижении затрат на ремонты и обеспечении бесперебойности технологических процессов.

Современный этап характеризуется переходом к системам управления надёжностью (RCM), риск-ориентированному обслуживанию (RBI) и предиктивным методам (PdM). Эти подходы основаны на анализе статистики отказов, оценке последствий неисправностей и использовании диагностических данных в реальном времени.

RCM базируется на системном анализе функций оборудования, видов отказов и последствий их проявления. Основные задачи RCM: идентификация критических узлов, определяющих надёжность технологического процесса; оценка вероятности и последствий отказов; выбор оптимальной стратегии обслуживания (ППР, PdM, замена по ресурсу или отказ по факту). В металлургической энергетике применение RCM позволяет сосредоточить внимание на турбинах, трансформаторах, компрессорах и насосах, чьи отказы напрямую влияют на производственный цикл.

RBI ориентируется на управление рисками и применяет матричный подход: риск = вероятность отказа × ущерб от последствий. Данный метод позволяет распределять ресурсы ремонтных служб неравномерно, усиливая контроль за оборудованием высокой критичности и снижая затраты на второстепенные узлы [3]. Для АО «Qarmet» характерна высокая интеграция энергетических систем с металлургическим процессом. PdM основывается на данных диагностических систем, которые позволяют прогнозировать развитие дефекта ещё до его критического проявления. В мировой практике используются следующие методы: виброакустическая диагностика для роторов турбин, насосов,

Раздел 4. «Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины»

компрессоров; термография для трансформаторов, распределительных устройств и кабельных линий; анализ масел для подшипниковых узлов и редукторов; электрические испытания ($\text{tg}\delta$, частичные разряды) для высоковольтного оборудования; онлайн-мониторинг технологических параметров (КПД, расход, температура, давление). Интеграция PdM в систему ППР позволяет заменить часть плановых ремонтов инспекциями по состоянию, а также прогнозировать ресурс агрегатов на основе трендов.

Научная оптимизация ППР базируется на статистическом моделировании отказов. Одним из ключевых инструментов является распределение Вейбулла, которое позволяет описывать три типа поведения:

- $\beta < 1$ — ранние отказы (некачественное изготовление или монтаж);
- $\beta \approx 1$ — случайные отказы (экспоненциальное распределение);
- $\beta > 1$ — износ, увеличивающий вероятность отказа со временем.

Данный подход позволяет учесть баланс между затратами на частые ремонты и рисками аварийных остановов. Таким образом, развитие концепций RCM, RBI и PdM формирует научную базу для оптимизации ППР. Внедрение данных подходов на металлургическом комбинате АО «Qarmet» позволит: снизить аварийность энергооборудования за счёт перехода к ремонту по состоянию; обеспечить рациональное распределение ресурсов ремонтных служб; согласовать ремонты с производственным планом, минимизируя простои; использовать цифровые технологии для прогнозирования отказов и планирования обслуживания.

В настоящее время система планово-предупредительных ремонтов на АО «Qarmet» строится на отраслевых нормативных документах и внутренних регламентах предприятия. Основные её характеристики:

Жёсткая календарная модель: межремонтные периоды закреплены в планах-графиках, утверждённых техническими службами.

Регламентные ремонты: выполнение текущих и капитальных ремонтов по заранее установленным срокам, независимо от фактической наработки оборудования.

Ориентация на опыт и «традицию»: корректировки графиков зачастую основаны на практическом опыте мастеров и инженеров, а не на статистическом анализе отказов.

Фрагментарная диагностика: применяются отдельные методы контроля (вибрация, термография, анализ масел), однако результаты редко интегрируются в единый цифровой контур.

Цеховая разобщённость: каждая служба (ТЭЦ, Энергоремонт, Газовое хозяйство) ведёт собственные журналы и базы данных, что снижает управляемость. Система в целом обеспечивает дисциплину ремонтов, но её эффективность снижается в условиях возрастающей сложности оборудования и требований к энергоресурсосбережению.

Система ППР энергооборудования на АО «Qarmet» сохраняет черты «классической советской модели», которая доказала свою работоспособность в условиях ограниченных технологий диагностики, но сегодня препятствует повышению эффективности и надёжности. Основные проблемы — это избыточные ремонты, аварийные простои и высокая стоимость содержания запасов.

Первым шагом в оптимизации системы ППР является разделение энергооборудования на группы по уровню критичности. Для этого используется ABC-классификация. Для управления ремонтом применяется риск-матрица/ Для оборудования категории А допустим только низкий риск (зелёная зона). Для категории В допускается средний риск (жёлтая зона). Для категории С допустим средний или даже повышенный риск (оранжевая зона), так как последствия не критичны. Таким образом, риск-матрица становится инструментом согласования ремонтных мероприятий с приоритетами бизнеса [3].

Одним из ключевых направлений оптимизации является включение в систему ППР методов предиктивной диагностики: вибродиагностика насосов, компрессоров и турбин; термография трансформаторов и РУ; анализ масла подшипников и редукторов; онлайн-мониторинг температуры, вибрации, КПД агрегатов. Данные методы позволяют уточнять фактическое состояние оборудования и корректировать для конкретного узла, заменяя часть ремонтов инспекциями по состоянию. Для практической реализации методики необходима интеграция с цифровыми системами управления.

Раздел 4. «Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины»

Оптимальным решением является создание единого контура ТОиР на базе CMMS или интеграция в существующую ERP-систему (SAP, 1С, QagazOptima) [7- 9].

Функционал такого контура включает хранение паспортных данных оборудования и истории ремонтов; автоматический сбор данных диагностики и эксплуатационных параметров; построение риск-матриц и прогнозных моделей; формирование динамических графиков ремонтов, согласованных с производственным планом [10].

Таким образом, методика оптимизации ППР сочетает риск-ориентированный подход, анализ надежности и предиктивное обслуживание, что обеспечивает научно обоснованный и практико-ориентированный механизм управления ремонтом энергооборудования.

На основании данных диагностики и анализа отказов были внесены изменения в регламенты для насосных станций часть плановых остановов заменена на регулярный контроль вибрации; для трансформаторов внедрён принцип «ремонт по состоянию» — их обслуживание теперь зависит от фактических данных анализа масла и термографии; для компрессоров установлены адаптивные интервалы ППР на основе Weibull-анализа их отказов.

Заключение

Результаты пилотных проектов и последующей апробации оптимизированной системы ППР на АО «Qarmet» позволяют сделать вывод о её высокой технико-экономической результативности. Основные показатели эффективности включают: снижение аварийных простоев оборудования: количество внеплановых остановов насосов и компрессоров сократилось на 18–20 %, что в денежном выражении соответствует экономии более 120 млн тенге в год. Повышение коэффициента технической готовности: средний показатель вырос с 0,92 до 0,95, что означает дополнительное время наработки порядка 250–300 часов в год на каждую критическую установку. Сокращение затрат на складские запасы: оптимизация номенклатуры ЗИП и переход к ремонту по состоянию позволили снизить материальные резервы на 10–12 %, что эквивалентно освобождению оборотного капитала на сумму порядка 80 млн тенге. Сокращение трудоёмкости ремонтных служб: благодаря переходу от «ремонта по календарю» к инспекционным мероприятиям, объём плановых работ уменьшился на 8–10 %, что высвободило рабочее время и позволило сократить сверхурочную занятость персонала.

Оптимизация ППР оказала положительное влияние и на социальные аспекты: сокращение вынужденных простоев привело к стабилизации графиков выпуска продукции, что снизило напряжённость в отношениях с заказчиками; повышение культуры технического обслуживания улучшило условия труда и уменьшило вероятность производственного травматизма; развитие компетенций персонала в области PdM и цифровых систем повысило его профессиональный уровень и адаптивность к будущим вызовам.

С учётом общемировых тенденций в области управления производственными активами, следующими этапами развития системы ППР на АО «Qarmet» должны стать:

Полномасштабное внедрение Smart Maintenance — объединение диагностических систем, SCADA и ERP в единый цифровой контур, обеспечивающий сквозное планирование ремонтов.

Применение искусственного интеллекта для анализа «больших данных» (Big Data), включающих телеметрию, архивы отказов и эксплуатационные журналы. Алгоритмы машинного обучения могут прогнозировать вероятность отказа с точностью до 80–90 %.

Развитие компетенций персонала — формирование на базе предприятия школы PdM-инженеров, владеющих современными методами диагностики и анализа данных.

Применение оптимизированной модели ППР на всем энергохозяйстве АО «Qarmet» позволит: сократить суммарные издержки на обслуживание оборудования на 12–15 %; снизить вероятность тяжёлых аварийных остановов на 25–30 %; повысить коэффициент технической готовности до 0,96–0,97; создать условия для устойчивого роста производительности и энергоэффективности предприятия. Стратегически это обеспечит АО «Qarmet» конкурентные преимущества на рынке

Раздел 4. «Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины»

металлопродукции за счёт снижения себестоимости и повышения надежности производственного процесса.

Оптимизация системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) энергооборудования на АО «Qarmet» является стратегическим направлением повышения надежности и эффективности функционирования энергетического комплекса предприятия. Проведённое исследование показало, что традиционная календарная модель ППР, унаследованная из советской нормативной школы, в современных условиях обладает рядом существенных ограничений: она не учитывает фактическое состояние агрегатов, приводит к избыточным ремонтам и не гарантирует предотвращения внезапных отказов.

Разработанная и апробированная методика оптимизации ППР, основанная на сочетании риск-ориентированного обслуживания, концепции (RCM), методов статистического анализа отказов (распределение Вейбулла) и технологий предиктивного обслуживания (PdM), доказала свою эффективность в условиях АО «Qarmet». Внедрение интегрированной модели позволило: сократить аварийные простои на 15–25 %; повысить коэффициент технической готовности оборудования на 2–3 процентных пункта; снизить складские запасы ЗИП на 10–15 %; уменьшить трудоёмкость ремонтных служб на 8–12 %.

Помимо экономического эффекта, внедрение новой системы ППР привело к повышению промышленной безопасности, улучшению условий труда и росту квалификации инженерно-технического персонала. Это подтверждает высокую социально-экономическую значимость проекта.

Перспективы развития связаны с дальнейшей цифровизацией системы обслуживания: внедрением технологий искусственного интеллекта для прогнозирования отказов, созданием цифровых двойников критического оборудования и переходом к концепции Smart Maintenance. В этом контексте опыт АО «Qarmet» может стать модельным примером для других металлургических и энергетических предприятий Казахстана, формируя основу для национальной стратегии повышения надёжности производственных активов.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает, что оптимизация системы ППР — это не только технический и организационный проект, но и фундаментальный шаг в сторону устойчивого развития и технологической трансформации промышленности.

Список использованной литературы

1. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines.
2. ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines.
3. Гельманова З.С., Lisiecka K. Идентификация и действия в отношении ключевых рисков в деятельности компании // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 1-1. С. 114-118
4. Moubray J. Reliability-Centered Maintenance. – Industrial Press, 1997.
5. Jardine A.K.S., Tsang A.H.C. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. – CRC Press, 2013.
6. Гайдамака А.Н. Надежность и диагностика энергетического оборудования. – М.: Энергия, 2019.
7. Методические рекомендации по организации системы ТОиР энергооборудования металлургических предприятий. – АО «НИИМосстрой», 2021.
8. Nakajima S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. – Productivity Press, 1988.
9. Гельманова З.С., Конакбаева А.Н., Мезенцева А.В. Теория и практика энергоменеджмента: Монография.-Алматы. ТОО Лантар Трейд, 2020.-231с.
10. Ящур А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: Справочник / А.И. Ящур. М.: НЦ ЭНАС, 2018.-504 с.

Д.А. Валеев, А.А. Ильин, З.С. Гельманова, И.А. Малига

Раздел 4. «Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины»

"QARMET" АҚ-ДА ЭНЕРГИЯ ЖАБДЫҚТАРЫН ЖОСПАРЛЫ-АЛДЫН АЛУ ЖӨНДЕУ ЖҮЙЕСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада сенімділіктің теориялық негіздері, сондай-ақ практикалық өндірістік тәжірибе тұрғысынан "Qarmet" ақ энергетикалық жабдықтарын жоспарлы-алдын алу жөндеулерінің (ППР) қолданыстағы жүйесіне кешенді талдау жүргізілді. Қазіргі жағдайда бекітілген жөндеуаралық интервалдарға бағытталған ППР дәстүрлі күнтізбелік моделі бірқатар жүйелік проблемаларға әкелетіні көрсетілген: жабдықтың шамадан тыс тоқтауы, жөндеу "терезелерінің" металлургиялық өндіріс кестелерімен сәйкес келмеуі, пайдалану мен қызмет көрсету персоналының шығындарының өсуі, сондай-ақ кенеттен істен шығу ықтималдығының жоғары болуы, әсіресе маңызды жабдықтар үшін (қазандық), турбиналық, компрессорлық және электротехникалық).

ППР жүйесін сенімділікке бағытталған тәуекелге бағдарланған қызмет көрсету және қызмет көрсету жағына өзгерту қажеттілігі негізделген. Жұмыста жабдықты сыни тұрғыдан жіктеуді, істен шығудың статистикалық талдауын (атап айтқанда, Вейбуллы бөлуді) қолдануды, сондай-ақ болжамды техникалық қызмет көрсету элементтерін енгізуді қамтитын оңтайландырудың интеграцияланған моделі ұсынылған. вибродиагностикаға, термографияға, майды талдауға және электрлік сынақтарға негізделген.

Диагностика нәтижелерін өндірістік активтерді басқарудың корпоративтік жүйелеріне (CMMS/ERP) біріктіру мәселелеріне ерекше назар аударылады, бұл әртүрлі бақылау шараларынан жабдықтың өмірлік циклін басқарудың бірыңғай тізбегіне өтуге мүмкіндік береді.

Пилоттық объектілерде (сорғы станциялары, компрессорлық қондырғылар, трансформаторлық шаруашылық) ұсынылған тәсілді сынақтан өткізу нәтижелері маңызды техникалық-экономикалық тиімділікті көрсетеді: авариялық тоқтап қалудың 15-25% - ға қысқаруы, қосалқы бөлшектер мен тораптардың қойма қорларына қажеттіліктің 10-15% - ға төмендеуі, энергия жабдықтарының дайындық коэффициентінің 2-3 пайыздық тармаққа өсуі. Қосымша нәтиже-техникалық қызмет көрсету мәдениетін жақсарту, жөндеу персоналының біліктілігін арттыру және сәтсіздіктерді болжау арқылы жөндеу қызметтеріне стресстік жүктемені азайту.

Түйінді сөздер: жоспарлы-алдын алу жөндеу, энергетикалық жабдық, сенімділік, оңтайландыру, тәуекелге бағытталған қызмет көрсету, болжамды қызмет көрсету (PdM), сәтсіздіктерді статистикалық талдау

D.A. Valeev, A.A. Ilyin, Z.S. Gelmanova, I.A. Maliga

OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF SCHEDULED PREVENTIVE MAINTENANCE OF POWER EQUIPMENT AT QARMET JSC

The article provides a comprehensive analysis of the current system of scheduled preventive maintenance (PRT) of power equipment of JSC "Qarmet" from the perspective of both the theoretical foundations of reliability and practical production experience. It is shown that the traditional calendar model of maintenance management, focused on fixed repair intervals, in modern conditions leads to a number of systemic problems: excessive shutdowns of equipment, inconsistency of repair "windows" with schedules of metallurgical production, increased costs of operation and maintenance personnel, as well as maintaining a high probability of sudden failures, especially for critical equipment (boiler, turbine, compressor, and electrical equipment).

The necessity of transformation of the HRM system towards risk-oriented maintenance and reliability-oriented maintenance is substantiated. The paper proposes an integrated optimization

Раздел 4. «Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины»

model that includes the classification of equipment by criticality, the use of statistical failure analysis (in particular, Weibull distribution), as well as the introduction of predictive maintenance elements. based on vibration diagnostics, thermography, oil analysis and electrical tests.

Special attention is paid to the integration of diagnostic results into corporate asset management systems (CMMS/ERP), which makes it possible to move from disparate control measures to a single equipment lifecycle management contour.

The results of testing the proposed approach at pilot facilities (pumping stations, compressor units, transformer facilities) demonstrate a significant technical and economic effect: reduction of emergency downtime by 15-25%, reduction in the need for spare parts and assemblies by 10-15%, increase in the availability factor of power equipment by 2-3 percentage points. An additional result is an improved maintenance culture, advanced training of repair personnel, and a reduction in the stress burden on repair services due to greater predictability of failures.

Keywords: scheduled preventive maintenance, power equipment, reliability, optimization, risk-based maintenance, predictive maintenance (PdM), statistical failure analysis

References

1. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines.
2. ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines.
3. Gelmanova Z.S., Lisiecka K. Identification and actions regarding key risks in the company's activities // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017. No. 1-1. pp. 114-118
4. Moubray J. Reliability-Centered Maintenance. – Industrial Press, 1997.
5. Jardine A.K.S., Tsang A.H.C. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. – CRC Press, 2013.
6. Gaidamaka A.N. Reliability and diagnostics of power equipment. Moscow: Energiya, 2019.
7. Methodological recommendations on the organization of the MRO system for power equipment of metallurgical enterprises. – JSC NIIMosstroy, 2021.
8. Nakajima S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. – Productivity Press, 1988.
9. Gelmanova Z.S., Konakbayeva A.N., Mezentseva A.V. Theory and practice of energy management: Monograph.- Almaty. Lantar Trade LLP, 2020.-231с.
10. Fmdur A.I. System of maintenance and repair of energy equipment: Handbook / A.I. FMD. Moscow: NC ENAS, 2018.-504 p.